

Janne Koskinen

LAAKERIEN VÄRÄHTELYMITTAUKSET VL TURVALLA

Opinnäytetyö

Merenkulun koulutusohjelma / merenkulkualan insinööri

Elokuu 2015

Tekijä/Tekijät	Tutkinto	Aika
Janne Koskinen	Merenkulkualan in- sinööri	Elokuu 2015
Opinnäytetyön nimi		79 sivua 3 liitesivua
Laakerien värähtelymittaukset VL Turvalla		
Toimeksiantaja		
Rajavartiolaitos		
Ohjaaja		
Lehtori Ari Helle		
Tiivistelmä		
<p>Opinnäytetyö on tehty Rajavartiolaitoksen toimeksiannosta. Työ on kohdennettu kesäl- lä 2014 käyttöönotettuun vartiolaiva Turvaan. VL Turva on uuden sukupolven monitoi- mialus, joka kykenee vastaamaan monipuolisesti Rajavartiolaitoksen merellä tapahtu- viin tehtäviin.</p> <p>Opinnäytetyön tavoitteena oli tehdä suunnitelma ja siihen perustuva toteutus värähte- lymittauksien aloittamiseksi VL Turvalla. Projektissa määritettiin mitattavat laitteet ja käynnistettiin niiden mittaustoiminta. Valtaosa projektiin käytetystä ajasta on kulunut mittaustoiminnan valmisteluihin aluksen laitetoissa. Laakerien värähtelymittauksilla seurataan laitteiden käytönaikaista tilaa. Hyvin toteutetuilla värähtelymittauksilla voi- daan säästää rajallisia henkilöstöresursseja. Lisäksi töiden kohdentaminen välittömästi huoltoon tarvitseviin kohteisiin tehostuu. Luotettava ja tehokas mittaustoiminta parantaa aluksen operatiivista tehokkuutta monilla tavoin. Projektin tavoitteet saavutettiin ja mit- taustoiminta on aloitettu.</p> <p>Opinnäytetyössä värähtelymittauksien tarkastelu keskittyy laivaolosuhteissa tehtäviin mittauksiin. Merellä mittaustapahtumaan vaikuttaa useat ulkoiset tekijät, kuten meren- käynti ja sen alukselle aiheuttamat liiketekijät. Tämän opinnäytetyön mukaisesti toteu- tetun värähtelymittaustoiminnan käytettävyyttä laivaolosuhteissa tulee arvioida myö- hemmin. Tämän opinnäytetyön ja mittaustoiminnan arvioinnista saatavia tuloksia voi- daan jatkossa hyödyntää myös muissa Rajavartiolaitoksen aluksissa.</p>		
Asiasanat		
Rajavartiolaitos, kunnossapito, laakerien värähtelymittaus		

Author (authors)	Degree	Time
Janne Koskinen	Marine Technology	August 2015
Thesis Title		
Vibration measurements on OPV Turva		79 pages 3 pages of appendices
Commissioned by		
Finnish Border Guard		
Supervisor		
Ari Helle, Senior Lecturer		
Abstract		
<p>This thesis was commissioned by the Finnish Border Guard and is focused on offshore patrol vessel Turva. OPV Turva is a modern latest-generation patrol vessel which is capable of responding to multiple Border Guard tasks at sea.</p>		
<p>The aim for the thesis was to design and perform bearing vibration measurements onboard OPV Turva. In this project, measurable equipment was defined and measurements were started. Most of the project time was used in the preparation of measuring points in technical areas. The aim for the measurements is to monitor the state of equipment during operation. Crew hours can be saved with quality vibration measuring. Also, maintenance can be focused for the equipment which needs quicker response. Reliable and efficient measuring will improve the vessel's operative efficiency in many ways. The objective for the project was met and active measuring process was started.</p>		
<p>The focus in vibration analysis is on seagoing vessels. Vibration measuring onboard a vessel at sea is influenced by multiple external factors such as sea state and movements of the vessel. The reliability of the measurement results must be evaluated later. Information about these measurement methods and results can also be used for other Finnish Border Guard vessels.</p>		
Keywords		
Finnish Border Guard, maintenance, bearing vibration		

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	8
1.1	Työn tausta ja rajaukset	8
1.2	Vartiolaiva Turva	9
2	KUNNOSSAPITO	9
2.1	Kunnossapidon määritelmiä ja kunnossapitolajit.....	9
2.2	Kunnossapitostrategia	12
2.2.1	RCM - Luotettavuuskeskeinen kunnossapito	13
2.2.2	TPM - Kokonaisvaltainen tuottava kunnossapito	14
2.3	Ehkäisevä kunnossapito	15
2.4	Kuntoon perustuva kunnossapito ja kunnonvalvonta	17
3	VÄRÄHTELYMITTAUKSET	19
3.1	Teoriaperusteet	19
3.1.1	Määritelmät, suureet ja mittayksiköt	20
3.1.2	Käsitteet ja parametrit	23
3.2	Valvontamenetelmät.....	27
3.2.1	Kokonaistasovalvonta	28
3.2.2	Tunnuslukuvalvonta	30
3.2.3	Aikatasovalvonta.....	32
3.2.4	Spektrivalvonta	33
3.2.5	Verhokäyrävalvonta ja PeakVue™	35
3.2.6	Vektori-, profiili- ja kepstrivalvonta.....	37
3.2.7	Korkeataajuisen värähtelyn valvontamenetelmät	38
3.3	Laakerien vikadiagnostiikka.....	41
3.3.1	Värähtelyn vaikutus laakereihin.....	41
3.3.2	Vianmääritys	42
3.3.3	Vierintälaakerin vikojen tunnistaminen	44
3.3.4	Liukulaakerin vikojen tunnistaminen.....	51
3.4	Mittaustoiminta	52
3.4.1	Mittausanturi ja mittauspiste.....	53

3.4.2	Mitattavien laitteiden määrittäminen ja mittausvälit.....	56
3.4.3	Mittaustoiminnan järjestely	59
4	KUNNOSSAPITO JA LAAKERIEN VÄRÄHTELYMITTAUKSET VL TURVALLA	60
4.1	Yleistä	60
4.2	Kunnossapitostrategia	61
4.3	Kriittisyysarviointi	63
4.4	Mittausreitti ja –pisteet.....	64
4.5	Mittaustoiminta	70
4.6	Tavoitteet	74
5	LOPPUPÄÄTELMÄ	75
	LÄHTEET	78
	LIITTEET	
	Liite 1. Pumppujen vianhaku spektrin avulla	
	Liite 2. Laitetason kriittisyyden tekijät	
	Liite 3. Jatkuvatoimisille laitteille suositeltavat mittausvälit	

LYHENTEET

VL	Vartiolaiva
OPV	Offshore Patrol Vessel, ulkovartiolaiva
DP	Dynamic Positioning, automaattinen paikallaanpitojärjestelmä
GL	Germanischer Lloyd, luokituslaitos
SFS	Suomen Standardoimisliitto
EN	Eurooppalaisessa standardisoimisjärjestössä vahvistetun standardin tunnus
PSK	Standardisointiyhdistys ry
RCM	Reliability Centered Maintenance, luotettavuuskeskeinen kunnossapito
TPM	Total Productive Maintenance, kokonaisvaltainen tuottava kunnossapito
RTF	Run To Failure, laitteen käyttö rikkoutumiseen saakka
FAA	Federal Aviation Agency, Yhdysvaltain ilmailuvirasto
SRCM	Streamlined Reliability Centered Maintenance, kevennetty versio luotettavuuskeskeisestä kunnossapidosta
NDT	Non Destructive Testing, rakennetta rikkomaton testaus
SI	Kansainvälinen yksikköjärjestelmä
RPM	Rotations Per Minute, kierrosta minuutissa
FFT	Fast Fourier Transform, nopea Fourier-muunnos

ISO	International Organizational Standardization, kansainvälinen standardoimisjärjestö
RMS	Root Mean Square (value), tehollisarvo
SPM	Shock Pulse Method, iskusysäysmenetelmä
AE	Acoustic Emission, akustinen emissio
SEE	Spectral, Emitted Energy, kaupallinen vierintälaakerin monitorointimenetelmä
RFID	Radio Frequency Identification, radiotaajuinen etätunnistus
RP	Redundant propulsion, varmennettu propulsio
HVAC	Heating, Ventilation and Air-Conditioning, lämmitys, vesi ja ilmastointi
DE	Drive end, vetävä pää
NDE	Non drive end, vapaa pää

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta ja rajaukset

Rajavartiolaitoksessa on otettu käyttöön vuonna 2014 uuden sukupolven ulkovartiolaiva. Alus on rakennettu Rajavartiolaitoksen ja sen yhteistyöviranomaisten tarpeet huomioiden. Vartiolaiva Turva on monitoimialus, jolla on kyky toimia useissa erilaisissa rajavalvonta-, pelastus- ja avustustehtävissä. Aluksella on lisäksi monipuoliset käyttöominaisuudet ympäristöönnettomuuk-sien torjuntatehtäviin.

Monitoimialuksen käyttöominaisuuksista johtuen erilaisten koneikoiden ja laitteistojen määrä on mittava. Tämä asettaa VL Turvan teknisen henkilöstön haastavaan tilanteeseen. Laitteistot tarvitsevat jatkuvaa huoltoa ja valvontaa toimiakseen luotettavasti. Tehokas kunnossapito rajallisella henkilöstöresurs-silla vaatii hyvin suunniteltua ja organisoitua kunnossapidon toimintamallia, johon koko henkilöstön tulee olla sitoutunut. Tehokkaalla kunnossapidolla ja kunnonvalvonnalla pystytään parantamaan aluksen käytettävyyttä operatiivisessa toiminnassa.

Rajavartiolaitoksen alustarkastajat ehdottivat opinnäytetyön aiheeksi suunnittelutyötä ja siihen perustuvaa toteutusta laakerien värähtelymittauksien aloittamiseksi VL Turvalla. Laakerien värähtelymittaukset ovat yksi kuntoon perustuvan kunnossapidon mittausmenetelmistä. Aiemmin oli jo tehty päätös kannettavan FAG Detector III -mittauslaitteiston hankinnasta. Opinnäytetyö perustuu mittaustoiminnan suunnitteluun, kannettavan mittauslaitteen käyttöön ja mittaustulosten käsittelyyn FAG Trendline -tietokonesovelluksen avulla. Työssä tarkastellaan laivaolosuhteissa tehtävää värähtelymittausta. Muita kunnonvalvonnan mittausmenetelmiä ei käsitellä. Niiden käsittely opinnäytetyön laajuudessa ei ole mahdollista. Myöskään mitattujen tulosten analysointia ei käsitellä yksityiskohtaisesti, koska mittaustoiminta on vasta aloitettu. Mittauksia ei ole vielä kertynyt tarpeellista määrää, jotta tulosten analysoinnin voitiin arvioida olevan tarpeeksi luotettavaa.

1.2 Vartiolaiva Turva

VL Turva on kooltaan suurin Rajavartiolaitoksen laivoista. Laiva on 95,9 metriä pitkä ja 17,4 metriä leveä. Kokonaiskoneteho on 11 600 kilowattia. Aluksessa on kaksi 2400 kilowatin tehoista sähköpropulsiolaitetta ja yksi akseli-käyttöinen propulsiolaite. Näiden lisäksi aluksessa on kaksi 850 kilowatin tehoista keulaohjailupotkuria. Ohjailtavuutta ja monipuolisia käyttöominaisuuksia tehostaa automaattinen paikallaanpitojärjestelmä (DP- järjestelmä). Aluksen öljynkeräystankkien kapasiteetti on 1000 m³ ja kerätyn kemikaalin tankkien kapasiteetti 200 m³. Aluksen keulakannelle on rakennettu helikopterin laskeutumisalusta ja lentopetrolin tankkauspiste.

Turva on GL:n (Germanischer Lloyd) luokittama alus. Aluksen monikäyttöisyyttä kuvastaa pitkäkö luokkamerkintä. Luokkamerkintä pitää sisällään aluksen käyttöominaisuuksia ja koneistoa koskevia luokituksia.

VL Turvan luokkamerkintä:

GL 100A5, E4, DP2, NAV- OC, IW, S4D10, EP, HELILF, MARINE POLLUTION RESPONSE VESSEL, OIL RECOVERY VESSEL, CHEMICAL RECOVERY VESSEL, SPECIAL PURPOSE VESSEL, TUG GL MC, E4, AUT, GF FF1, RP3 (50%), INERT

2 KUNNOSSAPITO

2.1 Kunnossapidon määritelmiä ja kunnossapitolajit

Kunnossapidon tarkoitus ei ole ainoastaan parantaa teollisuus- tai tuotantolaitoksen tuottavuutta. Sen avulla voidaan myös ylläpitää luotettavuutta, toimintavarmuutta ja turvallisuutta monilla eri aloilla (Järviö & Lehtiö 2012, 19 - 20). Toimintavarmuus ja turvallisuus ovat avainasemassa merenkulkualan toiminoissa, joissa apu saattaa olla pitkän etäisyyden päässä. Ympäristöystävällisyys on korostunut ajansaatossa myös yhdeksi tärkeäksi onnistuneen kunnossapidon laatukriteeriksi (Järviö & Lehtiö 2012, 25).

Kunnossapito määritellään eurooppalaisessa standardissa SFS-EN 13306 seuraavasti: *Kaikki koneen elinjakson aikaiset tekniset, hallinnolliset ja liikkeenjohdolliset toimenpiteet, joiden tarkoituksena on ylläpitää tai palauttaa koneen toimintakyky sellaiseksi, että kone pystyy suorittamaan halutun toiminnon.* (Järviö & Lehtiö 2012, 17.)

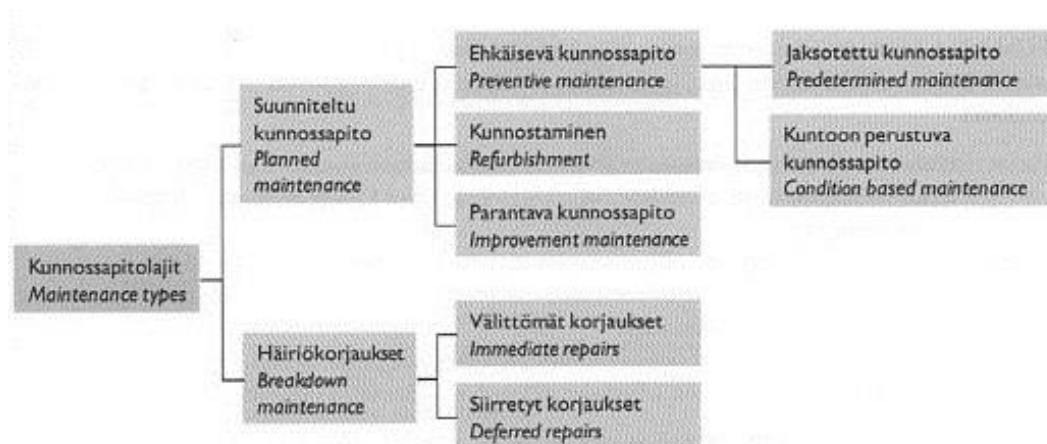
Suomalaisissa standardeissa PSK 6201 ja PSK 7501 määritellään kunnossapito seuraavin sanoin: *Kunnossapito on kaikkien niiden teknisten, hallinnollisten ja johtamiseen liittyvien toimenpiteiden kokonaisuus, joiden tarkoituksena on säilyttää kohde tilassa tai palauttaa se tilaan, jossa se pystyy suorittamaan vaaditun toiminnon sen koko elinjakson aikana.* (Mikkonen, Miettinen, Leinonen, Jantunen, Kokko, Riutta, Sulo, Komonen, Lumme, Kautto, Heinonen, Lakka & Mäkeläinen 2009, 26.)

Englantilainen John Moubray, joka tunnetaan luotettavuuskeskeisen kunnossapidon kehittäjänä, määrittelee kunnossapitoa seuraavasti: *Varmistaa tuotantovälineiden toiminta koko elinkaaren aikana. Varmistaa omistajien, käyttäjien ja yhteiskunnan tyytyväisyys. Valita ja käyttää kaikkein sopivimpia kunnossapidon menetelmiä, joilla hallitaan tuotantovälineiden vikaantumista ja vikaantumisen seurauksia. Saada kaikkien kunnossapitoon vaikuttavien ihmisten aktiivinen tuki kunnossapidon toimille.* (Järviö & Lehtiö 2012, 20.)

Kunnossapidon määrittäminen yhdellä lauseella antaa suuren mahdollisuuden erilaisille tulkinnoille. Mitä kunnossapito oikeastaan on ja kuinka se tulisi toteuttaa parhaalla mahdollisella tavalla? Vartiolaiva Turva on uusi toimintayksikkö. Uuden yksikön kunnossapitomallia luotaessa edellisessä kappaleessa viitattu John Moubrayn määritelmä antaa hyvän lähestymistavan mallin muodostamiseen. Lähestymistapaa tukee myös Rajavartiolaitoksen partiovene PV08:n kunnossapitoa käsittelevä opinnäytetyö, jossa Karppelin (2014, 9) toteaa seuraavasti: *Tässä opinnäytetyössä Moubrayn käytettävyyttä korostava lähestymistapa on luonteva, sillä lakisääteisten tehtäviensä perusteella muun muassa meripelastuksen päävastuuviranomaisena toimivan Rajavartiolaitoksen kannalta oleellista on juuri aluskaluston pysyminen jatkuvasti toimintakykyisenä ja suorituskykyisenä.*

Jokaisen toimijan, joka kehittää kunnossapitoa osaksi omaa toimintaansa on löydettävä yksikölleen parhaiten sopiva toimintamalli. Kunnossapitoa on luokiteltu eri standardeissa. Kunnossapidon jaottelut ja määritelmät ovat avainasemassa kunnossapitostrategiaa ja kokonaistoteutusta suunniteltaessa. Kunnossapidon jaottelua voidaan käyttää hyväksi suunniteltaessa mm. kunnossapidon taloutta, henkilöstömäärää, varaosahallintaa ja logistiikkatoimintaa (Ansaharju 2010, 300).

Suomalainen PSK 6201 standardi vuodelta 2011 jaottelee kunnossapitolajit suunniteltuun kunnossapitoon ja häiriökorjauksiin. PSK 6201 standardin kunnossapitolajien jaottelu on esitetty kuvan 1 kaaviossa. Standardi PSK 7501 vuodelta 2010 poikkeaa PSK 6201 standardista ainoastaan siinä, että kuntoon perustuva kunnossapito on jaettu kunnonvalvontaan sekä kuntoon perustuvaan suunniteltuun korjaukseen. (Järviö & Lehtiö 2012, 46 - 47). Tässä opinäytetyössä aihetta tarkastellaan standardin PSK 6201 mukaisesti, jossa kunnonvalvontaa pidetään kuntoon perustuvan kunnossapidon osa-alueena.

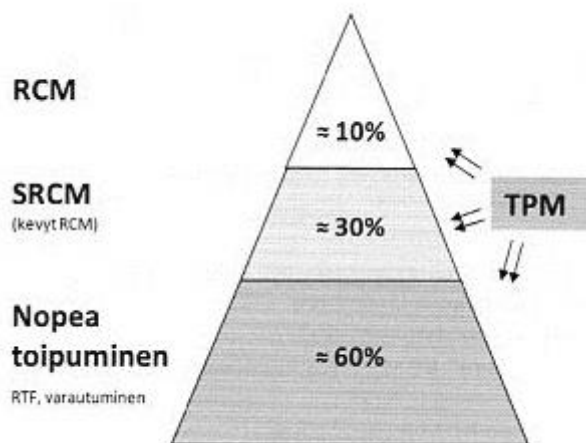


Kuva 1. Kunnossapitolajit standardin PSK 6201 mukaan. (Järviö & Lehtiö 2012, 47; PSK 6201)

Myös häiriökorjausta voidaan käyttää suunniteltuna kunnossapitomenetelmänä. Prosessin kannalta vähemmän kriittisiä ja kustannuksiltaan vähäpätöisempiä laitteita tai komponentteja voidaan käyttää ilman ehkäisevää kunnossapitoa. Vikaantuessaan ne vaihdetaan uusiin. Tällaista käyttötapaa kutsutaan lyhenteellä RTF (Run To Failure). (Järviö & Lehtiö 2012, 126.)

2.2 Kunnossapitostrategia

Valittaessa käyttökohteelle kunnossapitostrategiaa, kohdataan suunnitteluvaiheen aikana monia erilaisia olemassa olevia toimintakehyksiä ja niihin liittyviä käsitteitä. Strategian valintaa tukevaan suunnittelutyöhön on saatavilla erilaisia laatuohjelmia ja -järjestelmiä. Muita käytettävissä olevia valintaa tukevia välineitä ovat mm. käyttöomaisuuden hallinnan työkalut ja valmiiksi luodut kunnossapitomallit. (Järviö & Lehtiö 2012, 111.) Mikkonen (et al. 2009, 69) käyttää kunnossapitostrategiasta sanamuotoa kunnossapitofilosofia. Kummassakin edellä viitatussa teoksessa esitetään väittämä, että suoraan käyttöön otettavaa valmiin mallin mukaista kunnossapitostrategiaa ei ole helposti saatavissa. Lopullinen strategian valinta perustuu teosten mukaan vahvasti yksilöllisiin tarpeisiin. Yksilöllisen tarpeen muodostavat erilaiset tuotantomuodot, tuotteen arvo, ympäristö- ja henkilöstöriskit (Mikkonen et al. 2009, 69). Kuvassa 2 on kuvattu eräs teollisen sovellutuksen tarpeisiin valittu kunnossapitostrategia.



Kuva 2. Kunnossapitostrategian valinta teollisuuden sovellutukseen. (Järviö & Lehtiö 2012, 112)

Kuvan 2 kokonaisuus on toimiva strategia teollisuuden sovellutuksissa, joissa kriittisten laitteiden osuus on vain 10 %. Kriittisten laitteiden kunnossapito-ohjelma kannattaa laatia RCM:n määritelmien mukaan. RCM -menetelmän kalleudesta johtuen muihin laitteisiin on kuitenkin kannattavampaa käyttää SRCM -menetelmää tai mahdollisesti muita vielä kevyempiä menetelmiä. (Järviö & Lehtiö 2012, 112.) Oheisessa kuvassa esiintyy myös käsite TPM, jo-

ta käyttäen kunnossapitostrategia voitaisiin luoda kokonaisuudessaan. Tässä kappaleessa esitettyjen lyhenteiden RCM, SRCM ja TPM merkityksiä käsitellään tarkemmin luvuissa 2.2.1 ja 2.2.2.

2.2.1 RCM - Luotettavuuskeskeinen kunnossapito

Luotettavuuskeskeisestä kunnossapidosta käytetään yleisesti englannin kielen sanoista muodostuvaa lyhennettä RCM (Reliability Centered Maintenance). Kuten kunnossapidon määritelmiä käsittävässä luvussa 2.1 jo mainittiin, pidetään tämän toimintamallin kehittäjänä John Mobrayta. Toimintamalli on kehitetty alun perin 1950 - 1960 luvulla lentokoneiteollisuuden tarpeisiin (Järviö & Lehtiö 2012, 162.)

Luotettavuuskeskeisen kunnossapito ymmärretään yleisesti metodina, jonka mukaan suunnitellaan kunnossapidettävän kohteen kunnossapito. Koneelle tai sen osalle kehitetään toimintamallin avulla kunnossapito-ohjelma. Kunnossapito-ohjelmaa suunniteltaessa ja kehitettäessä valitaan juuri kyseiselle laitteistolle tai laitteistokokonaisuudelle sopivin kunnossapidon strategia. Osaksi kunnossapidon suunnittelua ja toteutusta on kehitetty työkaluja, joiden avulla voidaan tunnistaa prosessin kriittisimmät kohteet. RCM:n käyttöönoton yhteydessä käytetään yleisesti kriittisyysanalyysia. (Järviö & Lehtiö 2012, 161; Mikkonen et al. 2009, 75 – 78; Karppelin 2014, 18 - 20) Mobrayn mukaan RCM -metodin keskeisimmät päämäärät ovat (Järviö & Lehtiö 2012, 163; Moubray 1997):

- *Priorisoidaan prosessin laitteet, ja näin kohdistetaan kunnossapito sellaisiin laitteisiin, joissa sitä eniten tarvitaan. Tavanomaisimmat priorisointikriteerit ovat kustannukset, turvallisuus, ympäristövaatimukset ja laatu.*
- *Selvitetään laitteiden vikaantumismekanismit ja näin luodaan pohja oikeiden, tehokkaiden kunnossapitomenetelmien käytölle.*
- *Saatetaan kunnossapidon piiriin myös sellaiset raja- ja turvalaitteet, jotka prosessin toimiessa ovat ”passiivisia”*

- *Laaditaan sellaisille laitteille, joille ei löydy tehokkaita ehkäisevän kunnossapidon menetelmiä, valmiit toimintaohjeet käytettäväksi vikaantumisen ilmettyä.*
- *Opetetaan koneiden käyttöhenkilökunta seuraamaan kriittisten komponenttien toimintaa.*
- *Luodaan edellytykset analysoida kunnossapidon kustannuksia, parantaa prosessin tuottavuutta sekä laitteiden luotettavuutta.*

RCM -metodin täsmällinen toteutustapa on usein raskas ja kallis käytettäväksi. Tämä johtuu metodin vaatimuksista selvittää kaikki faktat kunnossapidon piiriin suunnitellusta prosessista. Tästä johtuen markkinoille on tullut erilaisia kevennettyjä versioita, joissa käytetään hyväksi jo olemassa olevia käyttökokemuksia ja prosessin laitteistotuntemusta. Kevennetyistä luotettavuuskeskeisen kunnossapidon versioista käytetään nimitystä SRCM (Streamlined Reliability Centered Maintenance). (Järviö & Lehtiö 2012, 162.)

2.2.2 TPM - Kokonaisvaltainen tuottava kunnossapito

Kokonaisvaltaisen tuottavan kunnossapidon lyhenne TPM muodostuu englannin kielestä (Total Productive Maintenance). Sen kehittäjänä tunnetaan japanilainen Seiichi Nakajima. Nakajima oli omalta osaltaan luomassa pohjaa Japanin talouskasvulle 1970-luvun loppupuolella. TPM -filosofia perustuu ajatukselle, jossa tuotannon koneille ja laitteille luodaan pysyvästi mahdollisimman laadukkaat olosuhteet toimia. (Järviö & Lehtiö 2012, 143 - 146; Karppelin 2014, 17 – 18.)

TPM -toimintaan siirtyminen on mittava prosessi, johon vaaditaan koko henkilöstön täydellistä sitoutumista. Kokonaisvaltaisuudella tarkoitetaan TPM -toimintamallissa pyrkimystä tehokkuuteen taloudellisin mittarein. Sillä tarkoitetaan koko henkilöstön kokonaisvaltaista osallistumista tuloksellisuuteen, riippumatta heidän asemastaan työyhteisössä. Pyrkimyksenä on myös pienentää kokonaiskunnossapidon tarvetta, helpottaa huolto- ja korjaustoimenpiteitä rakenteellisilla muutoksilla sekä tehostaa ehkäisevää huoltoa. Nakajiman oppien

mukaan viisi TPM -mallin peruspilareja ovat (Järviö & Lehtiö 2012, 144 – 146; Karppelin 2014, 17 - 18.):

- *Lisätään suunnittelun avulla laitteiden tehokkuutta häviöitä karsimalla.*
 - *Parannetaan olemassa olevia suunnittelun ja kuntoon perustuvan kunnossapidon tasoa.*
 - *Määritetään vaatimustasot koulutettujen käyttäjien tekemille huolto- ja puhdistustöille.*
 - *Lisätään kunnossapidon ja käytön henkilökunnan taitoja ja motivaatiota yksilö- ja ryhmätason koulutuksella.*
- Aloitetaan ehkäisevät kunnossapitotoimet mukaan lukien suunnittelun ja hankintojen kehittäminen.*

2.3 Ehkäisevä kunnossapito

Ehkäisevästä kunnossapidosta käytetään kunnossapidon kirjallisuudessa myös lyhennettä EH. Tämä lyhenne on kuitenkin epälooginen muodostuksaan sanasta ennakkohuolto. Tästä johtuen Järviö ja Lehtiö (2012, 283) eivät suosittele käyttämään lyhennettä. Toisaalta Ansaharju (2010, 307) mainitsee kuitenkin, että ehkäisevä kunnossapito, huolto ja ennakkohuolto ovat käsitteinä lähellä toisiaan. Ehkäisevä kunnossapito määritetään vuodelta 2011 olevassa standardissa PSK 6201 seuraavasti: *Ehkäisevällä kunnossapidolla pidetään yllä kohteen käyttöominaisuuksia, palautetaan heikentynyt toimintakyky ennen vian syntymistä tai estetään vaurion syntyminen.* (Järviö & Lehtiö 2012, 95; PSK 6201.) Ehkäisevän kunnossapidon sanotaan koostuvan neljästä eri elementistä, joita ovat toimintaolosuhteiden ylläpito, suoritettavat tarkastukset, suunnitellut korjaukset ja modernisoinnit. Ehkäisevällä kunnossapidolla pyritään ylläpitämään jatkuva luotettavasti toimiva prosessi. Lainsäädäntö luo omalta osaltaan vaatimuksia prosessin luotettavalle toiminnalle. Lainsäädännöllisiä vaatimuksia voivat olla esimerkiksi työntekijöiden turvallisuuteen tai ympäristöturvallisuuteen liittyvät määräykset. (Järviö & Lehtiö 2012, 96 – 97; Karppelin 11 - 12.)

Ehkäisevä kunnossapito on mitoitettava oikein. Ehkäisevän kunnossapidon tehokkuutta voidaan arvioida sillä, kuinka paljon tulevasta työkuormasta on

tiedossa etukäteen. Hyvän kunnossapidon tunnusmerkkinä voidaan pitää mitaria, jossa 80 % työkuormasta on tiedossa kolme viikkoa etukäteen. Ehkäisevä kunnossapito on kannattavaa, kun kunnossapidon kustannukset jäävät pienemmiksi, kuin puutteen aiheuttamat menetykset. Kunnossapidon kohteelle on lisäksi oltava olemassa resursseja liikaa kuormittamaton ennakkohuoltomenetelmä. John Moubray on arvioinut, että jopa 40 - 70 % ennakoivasta kunnossapidosta tehdään turhaan. (Järviö & Lehtiö 2012, 96 - 97.) Tehokaan ehkäisevän kunnossapidon perusteena on suunnitelmallisuus ja aikatauluttaminen. Suunnittelua pidetään yhtenä kunnossapidon vaikeimmin toteutettavista osa-alueista. Ehkäisevän kunnossapidon työstä laaditaan perinteisesti hyödyntäen seuraavia tietoja (Järviö & Lehtiö 2012, 100.):

- Aiempi kokemus vikaantumisista
- Varaosat ja niiden käyttömäärät
- Koneen ja sen komponenttien toimintatapa
- Koneenvalmistajan ohjeet ja suositukset

Tavoitteena on ollut estää tunnetut rikkoutumistapaukset. Tässä menetelmässä on vaarana ylivoimaisuus ja tehottomien menetelmien käyttö. Ehkäisevän kunnossapidon tehokkuutta voidaan oleellisesti parantaa käyttämällä RCM- tai kriittisyysanalyysia. (Järviö & Lehtiö 2012, 100.) Kriittisyysanalyysissa jaetaan prosessi toiminnallisiin yksiköihin tai toimintoihin. Siinä rajataan kohde riittävän tarkasti, jotta toiminnan tehokkuus varmistetaan. Analyysiin liittyy tarkastelu. Mitä halutaan estää? Mitä sanovat valmistajan ohjeet ja kuinka varaosahuolto järjestyy? Laitteet jaetaan kriittisyysanalyysin pohjalta A-, B- ja C-laiteryhmiin. A- ja B-ryhmän laitteisiin kohdistetaan pääpaino ja C-ryhmän laitteille riittää pelkkä huolto. Analyysin tietojen perusteella laaditaan huolto-ohjelmat. RCM -analyysissa tehdään myös rajaukset ja selvitetään mitä tapahtuu, jos laitteen toiminnot eivät tapahdu halutulla tavalla. Analyysin selvitettäviin asioihin kuuluu myös mahdollisesti syntyvien vahinkojen ja kustannuksien arviointi. Analyysista saatavien tietojen perusteella toiminnot priorisoidaan ja laaditaan huolto-ohjelmat. Oikein kohdistettuna ja painotettuna ehkäisevällä kunnossapidolla parannetaan prosessin luotettavuutta ja sen myötä myös taloudellisuutta. (Järviö & Lehtiö 2012, 101.)

2.4 Kuntoon perustuva kunnossapito ja kunnonvalvonta

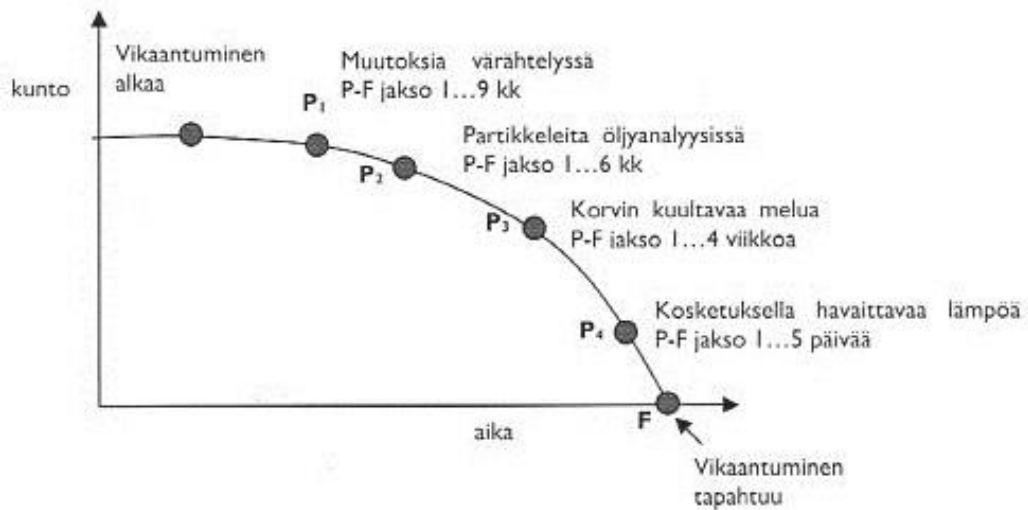
Kunnonvalvonnalla on tarkoitus päästä vaikuttamaan vikaantumiseen aikaisessa vaiheessa. Kunnonvalvontaa suoritettaessa tulee varmistua, että käytettävillä menetelmillä voidaan luotettavasti havaita todennäköiset viat ja tarvittaessa seurata niiden kehittymistä. (Mikkonen et al. 2009, 140; Moubray 1997.) Yleinen tavoite kunnonvalvonnassa on havaita vikaantumisen johdosta aiheutuva muutos mittaustrendissä. Havainnon perusteella selvitetään vikaantumisen vakavuusaste ja päätetään jatkotoimenpiteistä. (ABB 2000, 4.)

Kunnonvalvontaa voidaan tehdä monin eri tavoin. Tapa määräytyy kunnonvalvontaa toteuttavan yrityksen, tuotantolaitoksen tai yhteisön toimialasta riippuen. Yleisesti kunnonvalvonta mielletään laitteen toiminnan mittaamiseksi käyttäen erilaisia tilaa osoittavia tunnussuureita. Tunnussuureille on ennalta määritetyt mittausmenetelmät, mittauksen suoritustavat ja hälytysrajat. Kunnonvalvontamittauksia voidaan tehdä ainetta rikkomattomilla mittauksilla (NDT). Tällaisia mittautapoja ovat mm. ultraäänimittaus ja röntgenkuvaus. Myös värähtely- ja äänimittauksista saadaan käyttökelpoista tietoa. Öljystä voidaan niin ikään määrittää kemiallisesti ja hiukkasanalyysien tuloksia, joilla voidaan arvioida laitteiston sen hetkistä tilaa. (Ansaharju 2010, 302 - 303; Järviö & Lehtiö 2012, 96.)

Vikaantumismekanismien tunteminen auttaa määrittämään valvottavat suureet ja tavat, jolla kunnonvalvontaa toteutetaan. Vikaantumismekanismien on oltava myös sellainen, että sen kehittyminen on seurattavissa. (Mikkonen et al. 2009, 140; PSK 5704.)

Kaikkia laitteita ei voi, eikä ole edes tarkoituksenmukaista valvoa samalla kunnonvalvontamenetelmällä. Laitte- ja tapauskohtaisesti tulee arvioida, mikä on kannattavaa ja tuloksellista. Kuvassa 3 on esimerkki vierintälaakerin vikaantumisen vaiheista ja kulloinkin toimivista kunnonvalvonnan menetelmistä aikaan sidottuina. Kuvassa esitetään vikaantuminen P-F -käyrällä. Tästä esimerkistä voidaan havaita, että värähtelymittauksella on mahdollista saada indikaatio alkavasta vikaantumisesta varhaisessa vaiheessa. Värähtelyn muutokset ovat havaittavissa jopa useita kuukausia ennen toimintaa heikentävää tai keskeyttävää vikaantumista. Vian havaitseminen ei välttämättä johda välit-

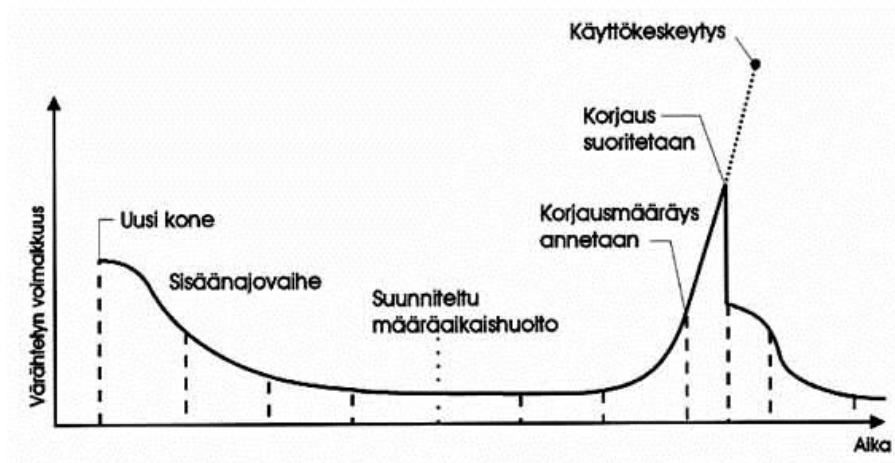
tömaan korjaukseen, vaan vian kehittymistä voidaan seurata uusintamittauksin. (Mikkonen et al. 2009, 140 - 141.)



Kuva 3. Vierintälaakerin vikaantumisen P-F -käyrä. (Mikkonen et al. 2009, 141)

Hyvissä ajoin todettu värähtelytason muutos antaa kunnonvalvontaa ja korjauksia tekeväälle henkilöstölle aikaa suunnitella ja valmistella korjausta sopivalle toteutusajankohdalle. Tämä kuitenkin edellyttää, että laitteen vikaantumismekanismi ja vikaantumisen kehittyminen kyseisen laitteen osalta tunnetaan ennalta. (Mikkonen et al. 2009, 141.) Tällaista toimintamallia kutsutaan ennakoivaksi kunnossapidoksi.

Kuten luvussa 1.1 mainittiin, tässä opinnäytetyössä keskitytään laakerien värähtelymittauksin suoritettavaan kunnonvalvontaan. Kuvassa 4 on esitetty laakerien värähtelymittauksin toteutettava ennakoiva kunnossapito aikatasossa. Y-akseli osoittaa värähtelyn voimakkuutta ja x-akselilla on kuvattu elinkaaren aika. Kuvan 4 esimerkin mukaan uuden koneen värähtelyn voimakkuus on suurempi, jonka jälkeen laakerin sanotaan "asettuvan paikoilleen" sisäänajon aikana ja värähtelyn voimakkuus heikkenee. Tässä esimerkissä suunniteltu määräaikaishuolto toteutetaan elinkaaren keskivaiheilla. Värähtelyn voimakkuuden noustessa katkoviivalla esitettyä mittaussväliä tihennetään. Korjausmääräys annetaan, kun värähtelyn voimakkuuden trendi havaitaan nousevaksi. Lopullinen korjaus toteutetaan ajoissa, ennen käyttökeskeytystä. (Kunnossapidon toiminnot ennen vian ilmenemistä. 2015.)



Kuva 4. Laakerin värähtelymittauksin toteutettu ennakoiva kunnossapito. (Kunnossapidon toiminnot ennen vian ilmenemistä. 2015)

Edellisen esimerkin mukainen ennakoiva kunnossapito kunnonvalvonnan värähtelymittauksien avulla mahdollistaa luotettavan ja tehokkaan laitteen toiminnan. Laitteen käyttö on taloudellista ja turhia aikaperusteisia laakerin uusintoja voidaan vähentää. Esimerkkitapauksen laakerin uusinta perustuu oikea-aikaiseen korjaukseen. Tarvittavan korjauksen ajankohta pystytään osoittamaan kunnonvalvonnan värähtelymittauksilla. Kuntoon perustuva kunnossapito on parhaimmillaan kuvan 4 mukaisesti toteutettua toimintaa. Kunnonvalvontaa on tehty mittauksien avulla säännöllisesti. Määräaikaishuolto on toteutettu valmistajan tai kokemuseräisesti luodun aikataulun mukaisesti. Värähtelymittauksilla on voitu osoittaa nouseva värähtelytrendi. Korjaus on tehty ajoissa ennen vikaantumista ja turhia käytön keskeytyksiä ei ole aiheutunut.

3 VÄRÄHTELYMITTAUKSET

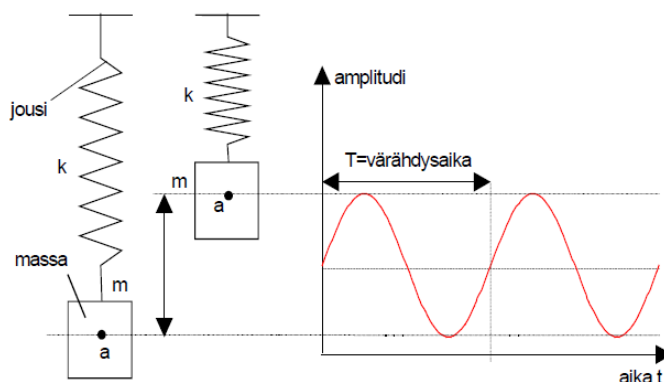
3.1 Teoriaperusteet

Tämän otsikon alla käsitellään värähtelyä fysikaalisena ilmiönä teoriatasolla. Monet värähtelymittauksien avulla saatavat arvot perustuvat matemaattisesti laskettuihin tuloksiin. Nykyaikaiset käytössä olevat analysointorit ja tiedonkeruulaitteiden tietoa käsittelevät tietokoneohjelmat tekevät nämä laskennat automaattisesti (ABB 2000, 5, 9). Laskenta tapahtuu ennalta syötettyjen arvojen ja mitatun datan avulla. Kunnonvalvontaa suorittavan henkilön tulee tuntea

käytettävät suureet, mittayksiköt ja parametrit. Teoriaperusteiden ymmärtäminen määritelmien ja käsitteiden luo perustan oikein tehdyille ja luotettavalle mittaustoiminnalle. (Mikkonen et al. 2009, 231.)

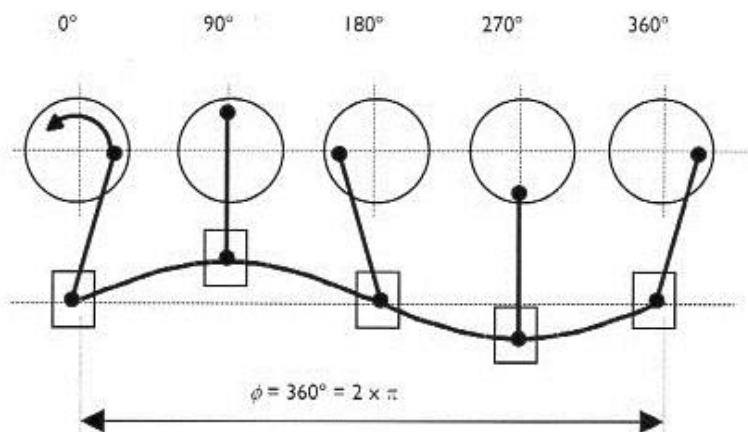
3.1.1 Määritelmät, suureet ja mittayksiköt

Käytännössä kaikki pyörivät laitteet värähtelevät. Värähtely aiheutuu dynaamisten voimien aikaansaamista herätteistä. Herätteet voivat aiheutua joko laitteen normaalitoiminnasta, siinä esiintyvistä viasta tai valmistuksen aikaisesta komponentin epätarkkuudesta. Värähtelymittauksien tekijän on opittava erottamaan laitteen normaalikäyntiin liittyvät värähtelyt vikaantumista indikoivista värähtelyistä. Värähtelymittauksilla tehtävä kunnonvalvonta perustuu yleensä herätteiden ja niiden muutosten selvittämiseen. (Mikkonen et al. 2009, 224.) Säännöllisesti tehtävien mittauksien avulla voidaan seurata laitteen värähtelytrendiä ja sen muuttumista. Vikaantumista indikoivaa värähtelyä voivat aiheuttaa epätasapaino, asennusvirheet, kuluminen, vaurioituneet osat ja huonosti tuettu tai kiinnitetty jalusta. Yleensä laitteen akseli tai roottori on varsinaisen värähtelyindikaation aiheuttava osa. Mittaus on kuitenkin lähes poikkeuksetta tehtävä laitteen rungosta, johon värähtely johtuu. (ABB 2000, 7.) Värähtelymittauksen mittauspiste pyritään valitsemaan mahdollisimman läheltä laakeripesää. Tätä aihetta käsitellään tarkemmin työn luvussa 3.4.1. Värähtelyä ilmiönä voidaan kuvata yksinkertaistetusti kuvassa 5 esitetyn jousi-massasysteemin avulla (Mikkonen et al. 2009, 181; ABB 2000, 7).



Kuva 5. Jousi-massasysteemi (ABB 2000, 7)

Kuvassa 5 massa m liikkuu tasapainoasemansa molemmin puolin. Tämä liike voidaan esittää koordinaatistossa, jossa x -akselilla kuvataan aika t ja y -akselilla amplitudi A . Yhden värähdysliikkeen aika T on se aika, jossa piste a liikkuu yhden edestakaisen liikkeen positiivisen ja negatiivisen maksimiarvon välillä. (Mikkonen et al. 2009, 181.) Jousi-massasysteemin värähtelystä muodostuvaa sinimuotoista signaalia kutsutaan aikatasosignaaliksi (ABB 2000, 7). Aikatasosignaalin värähdysaikaa T kuvaa vaihekulma ϕ , joka on täyttä kierrosta vastaava 360° . Täyden kierroksen arvo radiaaneina ilmoitetaan arvona 2π . Vaihekulman ja aikatazon välisen yhteyden osoittamiseksi voidaan käyttää kampimekanismin avulla esitettyä kuvaa 6. (Mikkonen et al. 2009, 227; ABB 2000.)



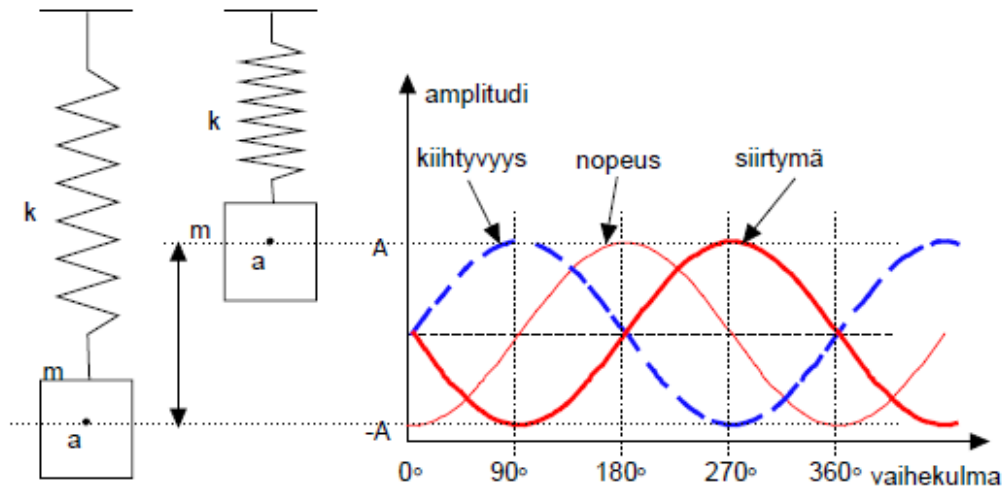
Kuva 6. Kampimekanismin avulla esitetty aikatazon ja vaihekulman yhteys. (Mikkonen et al. 2009, 227; ABB 2000)

Suomalaisessa standardissa PSK 5701 määritetään mekaanisessa värähtelymittauksessa käytettävät suureet, käytännön mittayksiköt, SI-mittayksiköt ja käyttöesimerkit. Standardin mukaiset suureet, mittayksiköt ja käyttöesimerkit on esitetty taulukossa 1. (Lumme, Backholm, Kautto, Miettinen, Nohynek, Suhonen, Valtokari, Kurkinen & Witick 2013, 20.) Suomalaisen standardin mukaan käytettävät mittayksiköt ovat yhdenmukaisia Euroopassa yleisesti käytettyjen mittayksiköiden kanssa.

Taulukko 1. Värähtelymittauksissa käytettävät suureet ja mittayksiköt. (Lumme et al. 2013, 30; PSK 5701)

Suure	Käytännön mittayksikkö	SI-mittayksikkö	Käyttöesimerkkejä
Siirtymä, s	μm	m	Akselivärähtely (s_{p-p} , s_p)
Nopeus, v	mm/s	m/s	Laakerivärähtely (v_{rms} , v_p)
Kiihtyvyys, a	m/s^2 , g	m/s^2	Laakerin kunto (a_{rms} , a_p)
Taajuus, f	Hz	Hz	Taajuusanalyysi
Pyörimisnopeus, n	1/min, rpm, 1/s	1/s	
Vaihekulma, ϕ	° (Aste)	rad	Vektorivalvonta
Jakso, T	ms	s	Aikatasoanalyysi

Kunnonvalvonnan mittaussuureena käytetään yleisesti värähtelynopeutta v. Muita käytössä olevia mittaussuureita ovat kiihtyvyys a ja siirtymä s. Nopeus voidaan laskea käyttämällä derivaattaa. Laskettaessa nopeutta, siirtymä derivoidaan kertaalleen ajan suhteen. Kiihtyvyys puolestaan voidaan selvittää matemaattisesti derivoimalla siirtymä ajan suhteen kahteen kertaan tai vastavasti derivoimalla tiedossa oleva nopeus kertaalleen. Jo aiemmin tämän luvun kuvassa 5 on käytetty esimerkkinä yksinkertaista jousi-massa systeemiä. Kuvassa 7 esitetään sama jousi-massa systeemi. Tässä kuvassa seurataan pisteen a nopeutta, kiihtyvyyttä ja siirtymää koordinaatistossa sinimuotoisina esiintyvinä käyriä. Koordinaatistossa x-akseli kuvaa vaihekulmaa asteina ja y-akseli amplitudin arvoa. (Mikkonen et al. 2009, 227 - 228; ABB. 2000, 7 - 8.)

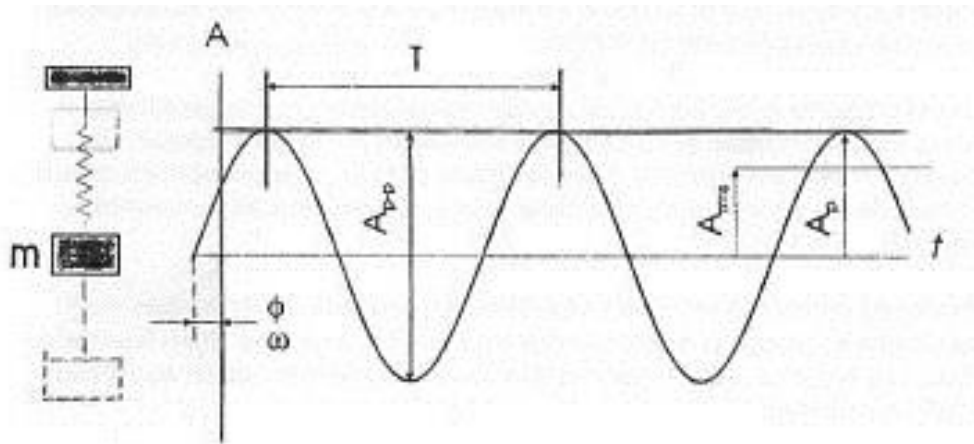


Kuva 7. Pisteen a värähtelyn kiihtyvyys, siirtymä ja nopeus yksinkertaisessa jousi-massa systeemissä. (ABB 2000, 8)

Kuvasta 7 voidaan havaita, että kaikilla mittaussuureilla on sama aaltomuoto, mutta vaihekulmat poikkeavat toisistaan. Kiihtyvyyden voidaan todeta olevan 90° edellä nopeutta. Nopeus on vastaavasti 90° edellä siirtymää. Tarkasteltaessa kuvaa on kuitenkin huomioitava, että vaikkakin aaltomuodot ovat toisiaan vastaavat, on niiden yhteydessä käytetyt yksiköt toisistaan poikkeavia. (Mikkonen et al. 2009, 228; ABB 2000, 8.) Standardin PSK 5701 taulukosta 1 on todettavissa, että nopeuden käytettävä yksikkö on mm/s. Kiihtyvyyden yksikkönä käytetään m/s^2 tai g, joka vastaa normaalia putoamiskiihtyvyyttä $9,81 \text{ m/s}^2$. Siirtymän yksikkönä on puolestaan käytössä μm eli $1/1000 \text{ mm}$. (Lumme et al. 2013, 20; PSK 5701.)

3.1.2 Käsitteet ja parametrit

Kappaleessa 3.1.1 käsiteltiin värähtelymittauksien suureita. Mittaustoiminnassa suureiden lisäksi on tunnettava myös mittauksien perusparametreja (Mikkonen et al. 2009, 231). Kuvassa 8 on esitetty standardin PSK 5701 mukaiset peruskäsitteet aikatasosignaalin. Kuvan y-akselia on kuvattu amplitudilla A . Kuvan mukaisia perusparametreja voidaan käyttää määrittäessä nopeutta v , kiihtyvyyttä a ja siirtymää s .



Kuva 8. Värähtelymittauksen peruskäsitteet (Lumme et al. 2013, 6; PSK 5701)

Kuvassa 8 esiintyviä suureita ovat:

- T Jakson aika
- f Taajuus
- ϕ Vaihekulma
- ω Kulmanopeus
- A_p Huippuarvo
- A_{p-p} Huipusta-huippuun arvo
- A_{rms} Tehollisarvo

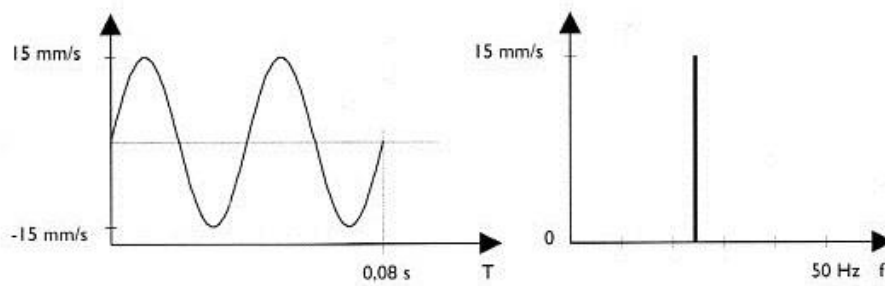
Aikatasoesitystä yleisempi tapa analysoida värähtelymittauksia on taajuustasoesitys. SI-järjestelmän mukaisesti taajuudelle f käytetään yksikköä hertsi Hz eli 1/s. Taajuus on arvo, joka kertoo kuinka monta värähdysliikettä tapahtuu aikayksikössä. (ABB 2000, 9.) Teoksessa nimeltään Tekniikan Kaavasto laskentayhtälö on kuvattu kaavan 1 mukaisesti (Mäkelä, Soininen, Tuomola & Öistämö 2010, 95).

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{T} \quad (1)$$

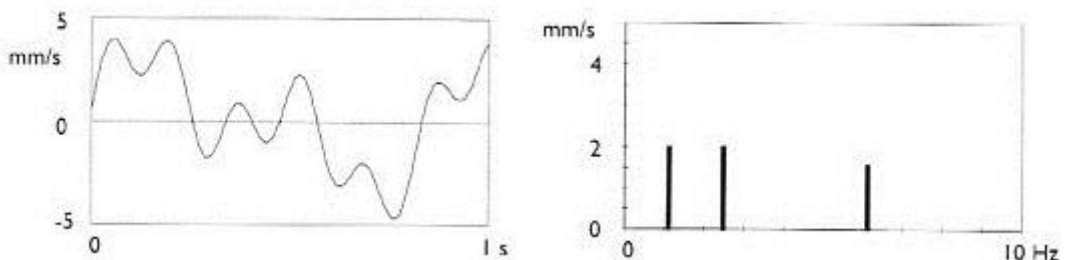
Yhtälössä T on jaksonaika, m on massa ja k on jousivakio. Samaa laskenta-kaavaa voidaan käyttää laskettaessa pyörimistaajuutta. Kaavan mukaisesti laskussa jaetaan kierrosnopeus ajalla. Pyörivien laitteiden kierrosnopeus n on yleensä ilmoitettu RPM -arvona (Rotations Per Minute). Tämä arvo kertoo, kuinka monta kokonaista kierrosta akseli pyörii minuutin (60 sekuntia) aikana.

Pyörimistaajuuden laskentaesimerkkinä voidaan käyttää sähkömoottoria, jonka tyyppikilvessä ilmoitetaan kierrosnopeudeksi 2950 rpm. Kierrostaajuus lasketaan käyttämällä kaavaa 1 (ABB 2000, 9). Sähkömoottorin pyörimistaajuuden lopputulokseksi saadaan tällä laskukaavalla 49,167 Hz.

Kuvissa 9 ja 10 on verrattu aika- ja taajuustasossa esitettyjä siniaaltoja toisiinsa. Kuvassa 9 on esitetty yksinkertainen siniaalto ja sen esiintyminen taajuustasossa. Kuvassa 10 on esitetty kolmesta eri siniaallosta muodostuva signaali. Jälkimmäisestä kuvasta voidaan havaita, että useasta eri siniaallosta muodostuvan signaalin analysointi on helpompi suorittaa käyttämällä taajuustasoa. Taajuustasoesitystä kutsutaan nimellä taajuusspektri. Se saadaan aikaan FFT-muunnoksella (Fast Fourier Transform), joka lasketaan aikatasosignaalista. (Mikkonen et al. 2009, 232 - 233; ABB 2000, 9 - 10.) Tässä opinnäytetyössä ei käsitellä FFT-laskennan teoriaa, koska VL Turvalla käytössä oleva laitteisto suorittaa tämän monimutkaisen laskennan itsenäisesti.



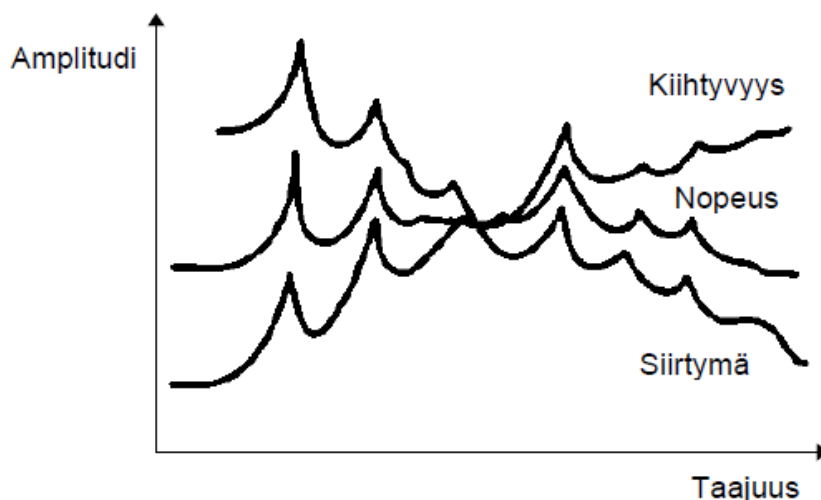
Kuva 9. Aika- ja taajuustasossa esitetty yksittäinen siniaalto. (Mikkonen et al. 2009, 232)



Kuva 10. Kolmesta siniaallosta muodostuva aikatasosignaali ja taajuustasoesitys. (Mikkonen et al. 2009, 233)

Taajuusspektrin käyttö ei vähennä aikatasotarkastelun merkitystä. Aikatasotarkastelussa saadaan esiin sellaisia signaalitietoja, jotka eivät välttämättä näy taajuustasoesityksessä. Yleisimmin aikatasoesityksessä käytetään mittaus suureena nopeutta, jota tarkastellaan amplitudin tehollisarvoilla. Saatavaa tietoa kutsutaan tehospektri. (ABB 2000, 10.)

Aiemmin luvussa 3.1.1 käsiteltiin yleisesti käytettäviä mittaus suureita nopeus, kiihtyvyys ja siirtymä. Kuvassa 11. on esitetty näiden suureiden vastaavuuksia taajuustasossa tarkasteltavina. Nopeutta pidetään näistä kolmesta mittaus suureesta parhaimpana värähtelyn vakavuutta kuvaavana suureena. Kuvasta voidaan myös havaita siirtymän korostavan enemmän matalia taajuuksia. Kiihtyvyyden havaitaan puolestaan korostavan korkeita taajuuksia. (ABB 2000, 10 - 11.) Nopeuden käyttö perusmittaus suureena on käyttökelpoisiin taajuusalueella 10 Hz – 1 000 Hz (Mikkonen et al. 2009, 228). Tämä on sopusoinnussa standardin PSK 5706 kanssa, jossa alle 10 Hz:n värähtelyn mainitaan soveltuvan valvottavaksi siirtymänä. Kiihtyvyyttä mittaus suureena suositellaan standardissa käytettäväksi silloin, kun ylärajataajuus on yli 1000 Hz. (Lumme et al. 2013, 67.) Tarkasteltavan taajuusalueen valintaan vaikuttaa oleellisesti mitattavan laitteen käyttöominaisuudet sekä tyypillisen vikaantumismekanismien ja vian kehittymisen tunteminen.

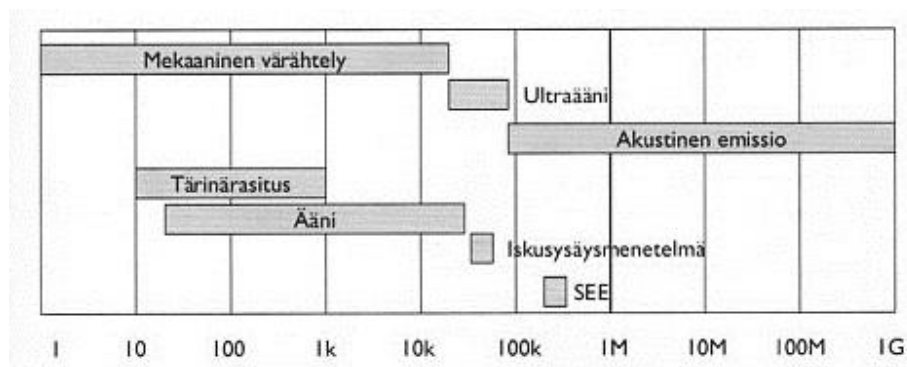


Kuva 11. Nopeus, kiihtyvyys ja siirtymä taajuusspektrissä. (ABB 2000, 10)

3.2 Valvontamenetelmät

Koneiden ja laitteiden kunnonvalvonnan värähtelymittauksissa on tarkoitus seurata niiden käytönaikaista tilaa. Värähtelyarvoille on annettu standardeissa ja valmistajien ohjeissa määritettyjä raja-arvoja. Yksin näiden raja-arvojen mukaan sovellettu kunnonvalvonta ei kuitenkaan ole tarkoituksenmukaista. Tärkeämpänä tekijänä kunnossapidon kannalta on värähtelytrendin seuraaminen. Trendissä havaittavat muutokset antavat kunnonvalvojalle tietoa koneessa tai laitteessa tapahtuneesta muutoksesta. Värähtelyn muutos saattaa olla suuri, vaikka hälytys- tai huomautusrajaan olisikin vielä paljon eroa. Standardeissa ja valmistajan ohjeissa esiintyviä raja-arvoja tulisi tulkitella suuntaa antavina. (Mikkonen et al. 2009, 292.)

Värähtelymittaukset voidaan jakaa mittaustaajuuden mukaan korkea- ja matalataajuisiin. Karkeasti esitettynä taajuusalueet ja niiden nimitykset jaetaan siten, että mekaaninen värähtely tapahtuu alueella 0 - 20 kHz. Taajuusalue 20 - 80 kHz vastaa ultraäänialuetta. Akustisen emission alue on taajuudella 80 kHz - 1 GHz. Eri taajuusalueille tarvitaan toisistaan poikkeavia mittaussuunnitelmia ja niihin soveltuvia laitteistoja. Kuvassa 12 on esitetty erilaisia mittaussuunnitelmia ja taajuusalueet, joille suunnitelmät sopivat. (Mikkonen et al. 2009, 247 - 248; Kuoppala et al. 1986; Kuoppala & Nevala. 1986; Eagle 1987.)



Kuva 12. Värähtelyn mittaussuunnitelmia ja niiden taajuusalueita. (Mikkonen et al. 2009, 247)

Tämän opinnäytetyön painoarvo on asetettu mekaanisen värähtelyn taajuusalueella tapahtuvaan valvontaan. Painotus on valittu näin, koska VL Turvalla oleva mittaustaitteisto soveltuu matalampien taajuuksien mittaamiseen alueella 0 - 20 kHz. Kokonaisvaltaisen kunnonvalvonnan ymmärtämisen kannalta on

kuitenkin hyvä tuntee erilaiset käytössä olevat valvontatekniikat ja niiden toimintaperiaatteet. Luvuissa 3.2.1 – 3.2.7 tarkastellaan eri valvontamenetelmiä.

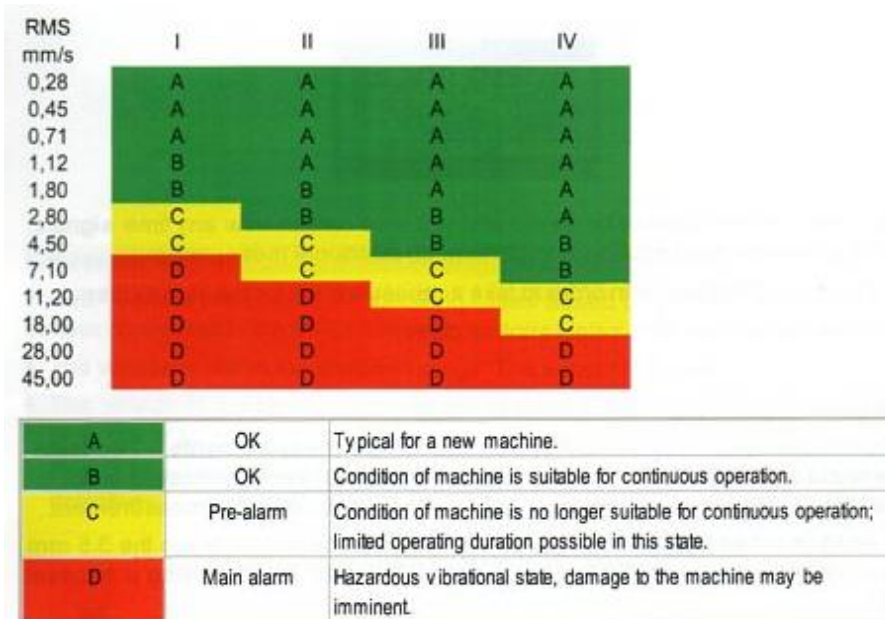
3.2.1 Kokonaistasovalvonta

Kokonaistasonvalvonta on suuntaa antava valvontamenetelmä, joka antaa viitteen laitteen yleiskunnosta. Se ei ole toimiva mittausmenetelmä tarkemmissa vianselvityksissä tai komponenttikohtaisessa kunnonvalvonnassa. Esimerkiksi vierintälaakerin vian selvittämiseen kokonaistasovalvonta ei sovellu. Värähtelyn kokonaistasonvalvontaa tulisikin käyttää rinnan tarkemman mittausmenetelmän kanssa. Sekä kansainväliset, että suomalaiset standardit määrittävät erilaisille koneille ja laitteille tärinärasituksen raja-arvoja. Myös laitevalmistajat antavat koneilleen omia tärinärasitusta koskevia ohjeita ja neuvoja. Suomalainen standardi PSK 5704 koskee koneita, joiden käyttöteho on yli 15 kW ja pyörimisnopeus alueella 120 - 15 000 RPM. Standardissa on jaettu koneet neljään ryhmään. Jaotteluperusteina ovat käyttöteho, akselikorkeus ja -liitos sekä alustan jäykkyys. Tämä standardi vastaa pääosin kansainvälistä standardia ISO 10816, joka on jaettu kuuteen eri osaan. Kussakin osassa käsitellään tyypiltään erilaisia teollisuuskoneita. (Mikkonen et al. 2009, 292.) Kuvasessa 13 on esitetty FAG Detector III -mittauslaitteiston käyttäjän manuaalissa esitetty ryhmäjako. Jaossa ryhmät esitetään luokissa 1 - 4 standardin ISO 10816 mukaisesti (Schaeffler Group 2011, 259; ISO 10816).

Classes	Explanation
I	Components of motors and machines rigidly connected with the complete machine under the usual operating conditions (typical: drive motor up to 15 kW output).
II	Medium-sized machines (typical: 15 kW to 75 kW output) without special foundations, rigidly constructed motors and machines (up to 300 kW) on special foundations.
III	Large motors and other large machines with rotating masses, constructed on rigid and heavy foundations that are relatively stiff in the direction of the vibration that is measured.
IV	Large motors and other large machines with rotating masses, constructed on foundations that are relatively forgiving in the direction of the vibration (e.g. turbo generating sets and gas turbines with an output greater than 10 MW).

Kuva 13. Koneiden ryhmäjako. (Schaeffler Group 2011, 259; ISO 10816)

Ryhmäjaon koneille on nähtävissä määritetyt värinärasitusrajat kuvassa 14. Arvot luokissa A ja B osoittavat normaaleja ja hyväksyttäviä arvoja. Luokka C kuvaa esihälytyksen raja-arvoa ja luokka D kuvaa vastaavasti päähälytyksen raja-arvoa.



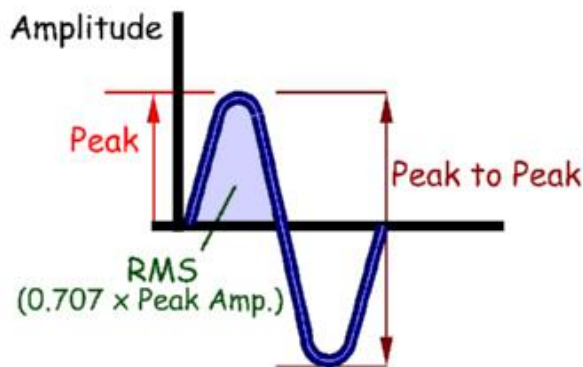
Kuva 14. Värinärasitusrajat ryhmittäin. (Schaeffler Group 2011, 259; ISO 10816)

Standardeissa annettuja värinärasitusrajoja voidaan käyttää hyödyksi myös koneen vastaanottotarkastuksen työvälineenä. Standardissa PSK 5704 on käsitelty koneen vastaanottotapahtumaa, jossa käytetään värinärasitusmittausta. Vastaanottotarkastuksen värinämittauksessa koneelle suoritetaan mittaus tehtaalla ennen käyttökohteeseen siirtoa ja uudestaan asennuksen jälkeen. Mittausarvoja verrataan toisiinsa ja niistä voidaan päätellä koneen yleiskunto. Koneita käytetään mittauksissa ilman kuormaa, nimelliskuormalla ja vahvasti kuormitettuna. Värinärasitus on suurin käytettäessä konetta kuormalla. (Lumme et al. 2013, 40 - 41; PSK 5704.)

Standardin PSK 5701 mukaan kokonaistasovalvonnassa mitataan nopeuden tehollisarvoa RMS, joka on lyhenne englannin kielen sanoista (Root Mean Square). RMS on hetkellisarvojen neliöiden keskiarvon neliöjuuri. Signaalin energiasisällön laskentayhtälö on esitetty kaavassa 2 (Lumme et al. 2013, 16; PSK 5701; Mikkonen et al. 2009, 254).

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} (\sum_{i=1}^N y_i^2)} \quad (2)$$

Sinimuotoisen käyrän kohdalla RMS on laskettavissa kertomalla amplitudin huippuarvo luvulla 0,707, joka on likiarvo laskusta $1 : \sqrt{2}$ (Lumme et al. 2013, 6, 16; PSK 5701; The difference between RMS, peak and peak to peak amplitudes. 2015). Yksinkertaistettu laskentatapa merkityksineen on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15. RMS -arvon laskenta. (The difference between RMS, peak and peak to peak amplitudes. 2015)

3.2.2 Tunnuslukuvalvonta

Tunnuslukuvalvonta perustuu värähtelymittauksista saatavien tulosten vertaamiseen aiempien tulosten kanssa. Tunnuslukuvalvonnassa voidaan käyttää hyväksi myös muita prosessista mitattavia parametreja. Muita tyypillisesti mitattavia parametreja ovat esimerkiksi lämpötila, paine, pyörimisnopeus ja virtausmäärä. Mitatuista arvoista muodostetaan trendi, joiden avulla määritetään erilaisia tunnuslukuja. Tunnuslukuja käytetään vikaantumis-, huolto-, ja korjausajankohtien määrittämiseen. Tunnuslukuvalvonta edellyttää säännöllistä trendiseurainta, jolla alkava vikaantuminen voidaan havaita riittävän ajoissa. (Mikkonen et al. 2009, 282 - 283.)

Vaativin työvaihe tunnuslukuvalvonnassa on mittausmääritysten ja tunnuslukujen suunnittelu. Tunnusluvun täytyy olla sellainen, että sillä voidaan ilmaista

yksittäisen vian kehitystä. Tunnuslukujen määrittämiseen voidaan käyttää apuna esimerkiksi tilastollista Kurtosis -menetelmää. Kurtosis -menetelmällä voidaan kuvata aikatasosignaalin piikikkyyttä. Menetelmä on toimiva erityisesti vierintälaakerin kunnon mittaamisessa. (Mikkonen et al. 2009, 283; Verkasalo 1986.) Kaavassa 3 on esitetty Kurtosis -arvon laskentayhtälö (Mikkonen et al. 2009, 254).

$$\alpha_4 = \frac{1}{N\sigma^4} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^4 \quad (3)$$

Toinen käytettävä laskentamenetelmä on Mikkosen (et al. 2009, 283) mukaan huippukerroin (Crest factor). Laskennan avulla selvitetään huippuarvon ja tehollisarvon suhdetta ilmaiseva C -arvo. C -arvo mitataan usein taajuusalueella 1 Hz - 10 kHz. Normaalikuntoisen koneen C -arvo asettuu tyypillisesti välille 2 - 6. C -arvo kuvaa signaalin piikikkyyttä Kurtosis -arvon tapaan. Huippukertoimen laskentayhtälö on esitetty kaavassa 4 (Mikkonen et al. 2009, 254).

$$CF = \frac{\max|y_{max}, y_{min}|}{\sigma} \quad (4)$$

Tunnuslukuvalvonta voidaan toteuttaa aika- tai taajuustasossa laskettavina tunnuslukuina. Suomalainen PSK 5706 standardi määrittää yleisimmin aikatasosta laskettavat tunnusluvut seuraavan luettelon mukaisesti (Lumme et al. 2013, 68; PSK 5706):

- *Tehollisarvo*
- *Huipusta huippuun arvo*
- *Huippuarvo*
- *Huippukerroin eli Crest Factor*
- *Kurtosis*

Yleisimmin taajuustasosta laskettaviksi tunnusluvuiksi standardi PSK 5706 puolestaan määrittää seuraavat tunnusluvut (Lumme et al. 2013, 68; PSK 5706):

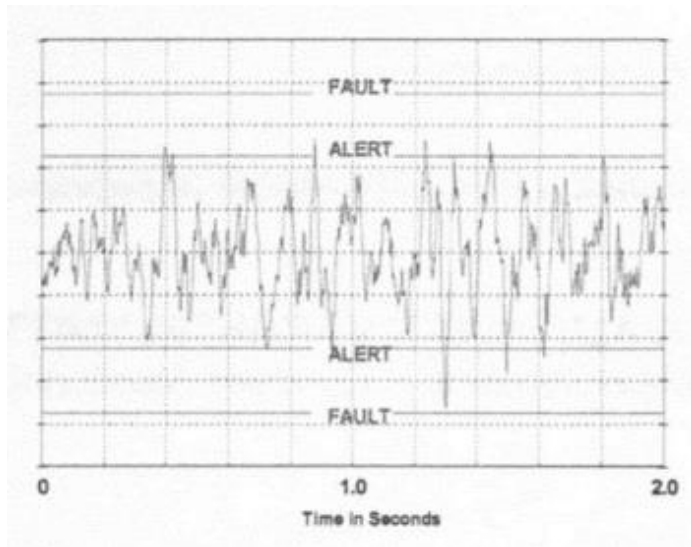
- *Pyörimistaajuudella tapahtuvan värähtelyn voimakkuus*
- *Pyörimistaajuudella tapahtuvan värähtelyn vaihekulma*
- *Pyörimistaajuuden monikerroilla tapahtuvan värähtelyn voimakkuus*

- *Värähtelyn voimakkuus vierintälaakerin sysäystaajuuksilla ja niiden monikerroilla*
- *Värähtelyn voimakkuus lapataajuudella ja sen monikerroilla*
- *Värähtelyn voimakkuus hammaspyöräparin ryntötaajuudella, sen monikerroilla ja niiden sivunauhoilla*
- *Rakenteen valitun ominaistajuuden sisältävän taajuuskaistan tehollisarvo*
- *Harmonisten värähtelykomponenttien tehollisarvo*
- *Ei harmonisten värähtelykomponenttien tehollisarvo*
- *Aliharmonisten värähtelykomponenttien tehollisarvo*
- *Valitun taajuuskaista tehollisarvo*

3.2.3 Aikatasovalvonta

Standardi PSK 5706 määrittää aikatasovalvonnan olevan aikatasosignaalin näytteen muodon vertailua asetettuun hälytysrajaan. Hälytysraja voi olla joko amplitudiarvo tai referenssimittauksien avulla määritetty hälytysrajakäyrä. (Lumme et al. 2013, 68; PSK 5706.)

Yksittäisten aikatasojen perusteella huippuarvoa seuraavaa valvontaa ei pidetä yleisesti tarkoituksenmukaisena. Tarkoituksenmukaisempaa on valvoa useammasta tahdistetusta aikatasonäytteestä saatavaa keskiarvoa. (Mikkonen et al. 2009, 287; Lumme et al. 2013, 68; PSK 5706.) Standardissa PSK 5706 aikatasovalvonta esitetään kuvan 16 mukaisesti. Kuvasta on havaittavissa hälytys- ja vaurioitumisrajojen asettelu.



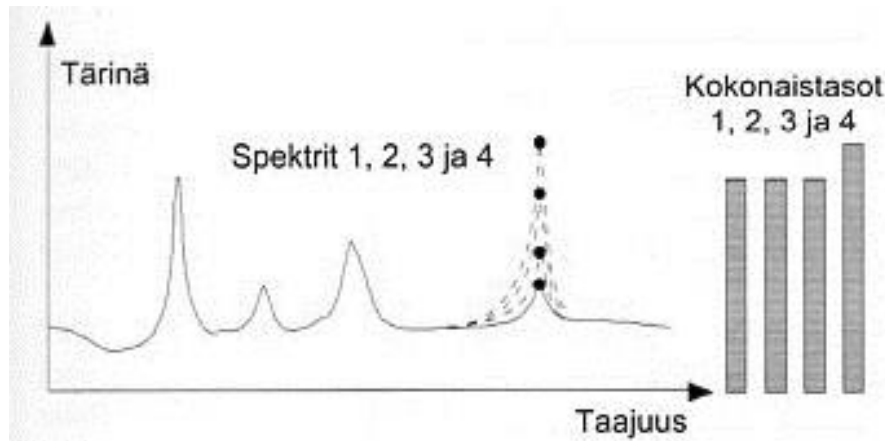
Kuva 16. Aikatasovalvonta ja hälytysrajat. (Lumme et al. 2013, 68)

3.2.4 Spektrivalvonta

Spektrivalvontaa ja siihen liittyvää FFT -laskentaa käsiteltiin pintapuolisesti jo luvussa 3.1.2, joka käsitteli värähtelymittauksiin liittyviä käsitteitä ja parametreja. Spektrianalyysi on tavallisimmin käytetty menetelmä vianmäärityksessä (Mikkonen et al. 2009, 285). Standardissa PSK 5706 spektrivalvonnan mainitaan olevan valvontamenetelmä, joka kattaa useita vikaantumismekanismeja (Lumme et al. 2013, 68; PSK 5706).

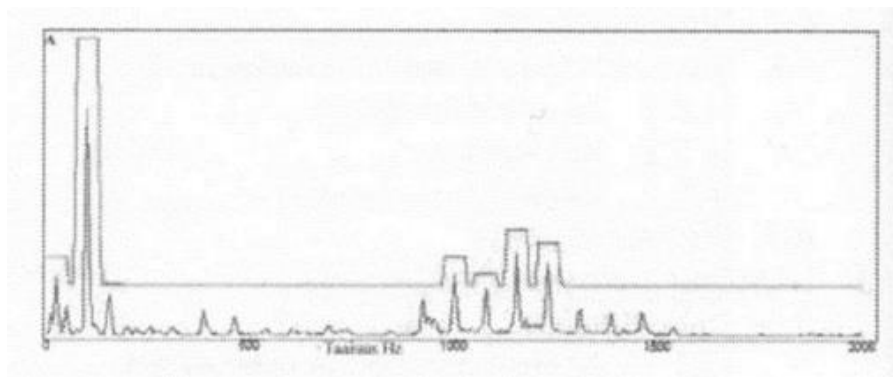
Kuten luvussa 3.1.2 jo aiemmin mainittiin ja havainnollistettiin kuvien 9 ja 10 avulla, perustuu spektrivalvonta aikatasosignaalista FFT -muunnoksen avulla laskettavaan taajuusspektriin. Vikaantumismekanismit ovat helpommin havaittavissa taajuustasoesityksenä. Spektrivalvonnalla voidaan arvioida yksittäisten koneen osien kuntoa. Spektrianalyysissa on huomioitava, että mitatussa amplitudispektrissä esiintyy yleisesti myös pyörimistaajuuden värähtelykomponentti. Pyörimistaajuudella esiintyvä värähtely on tyypillistä kaikille koneille, myös hyväkuntoisille. Spektrivalvontaa käytetään yleisesti rinnan kokonaistasotrendin valvonnan kanssa. Kuvassa 17 on esitetty spektrivalvonnalla havaittava vikaantuminen. Spektrivalvontaa verrataan kuvassa kokonaistasovalvontaan, jolla vikaantuminen voidaan havaita vasta myöhäisemmässä vaiheessa. Alkava vikaantuminen ei aiheuta muutosta värähtelyn kokonaistasoon. Kokonaistasovalvonnalla havaittava indikaatio saadaan vasta, kun vikaantuminen saat-

taa jo olla edennyt laitteen toiminnan kannalta kriittiselle tasolle. (Mikkonen et al. 2009, 285; ABB 2000, 9 - 10.)



Kuva 17. Vikaantumisen spektrissä ja kokonaistasoarvossa. (Mikkonen et al. 2009, 285)

Jo melko pienet spektrin amplitudien kohoamiset voivat indikoida vikaa laitteessa. Spektrien tarkastelu tulisikin toteuttaa aina riittävällä tarkkuudella. Värähtelymittauksesta saatavalle spektrille voidaan valvonnan helpottamiseksi luoda erillisiä taajuuskaistahälytyksiä tai aikaisempiin mittauksiin perustuva hälytysrajaspektri. (Mikkonen et al. 2009, 285.) Kuvassa 18 on esitetty standardissa PSK 5706 kuvattu spektrivalvonta ja valvonnan apuvälineeksi muodostettu hälytysrajaspektri (Lumme et al. 2013, 68; PSK 5706).



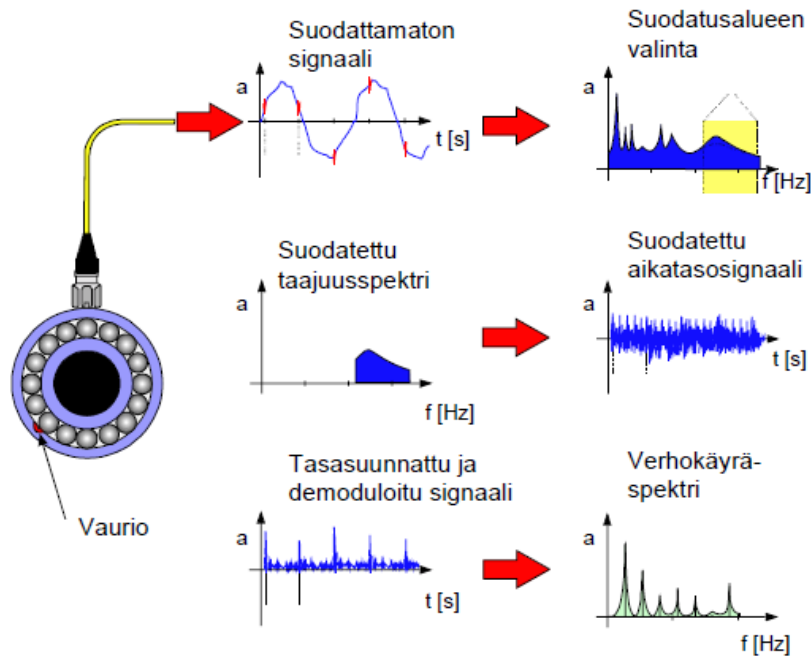
Kuva 18. Spektrivalvonta hälytysrajaspektriä käyttäen (Lumme et al. 2013, 68; PSK 5706)

3.2.5 Verhokäyrävalvonta ja PeakVue™

Standardissa 5706 määritetään verhokäyrävalvonnalla pystyttävän havaitsemaan alkavien vikojen aiheuttamia iskumaisia herähteitä. Verhokäyrävalvonnassa korkeataajuinen värähtelysignaali muokataan amplitudidemodulaatiolla matalataajuisiksi. Matalataajuisesta signaalista saatavaa dataa analysoidaan aikatasossa, taajuusspektrissä tai tunnuslukuina. Verhokäyrävalvonta on hyvä menetelmä hitaasti pyörivien laitteiden kunnonvalvontaan. (Lumme et al. 2013, 68; PSK 5706.) Verhokäyrävalvonnan avulla voidaan havaita alkava vika aiemmin, kuin ns. perinteisillä valvontatekniikoilla. Mikkonen (et al. 2009, 286) luonnehtii perinteisinä tekniikoina kokonaistaso- ja spektrivalvontaa.

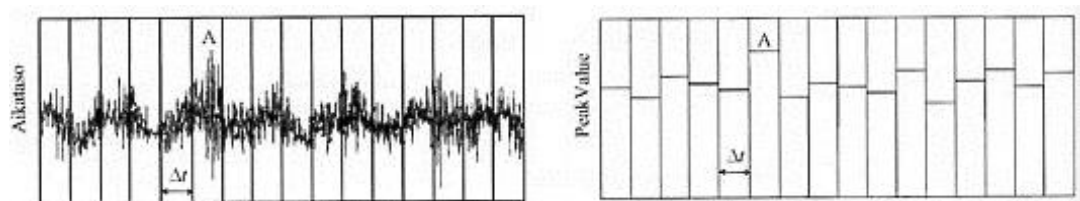
Verhokäyrätekniikalla on mahdollista poistaa analysoitavasta signaalista huonosta linjauksesta tai laitteen epätasapainosta johtuvia värähtelykomponentteja. Nämä värähtelyt ovat voimakkuudeltaan niin suuria, että ne peittävät useimmiten alleen alkavien laakerivikojen herähteet käytettäessä edellisessä kappaleessa esitettyjä perinteisissä mittaustekniikoissa. Amplitudimodulaatiolla tarkoitetaan mittaustapaa, jossa mittaussignaali kerrotaan toisella signaalilla. Toista signaalia kutsutaan kantoaallosi. Kun nämä kaksi signaalia summautuvat yhdessä muodostuu signaali, josta voidaan analysoida kantoaallon molemmille puolille muodostuvia taajuuskomponentteja. Näitä komponentteja kutsutaan sivuaalloiksi. Verhokäyrävalvonnan yhteydessä kohdataan kaksi eri käsitettä, jotka eroavat toisistaan. Nämä käsitteet ovat amplitudimodulaatio ja –demodulaatio. Demodulaatioksi kutsutaan amplitudimoduloituneen signaalin erottamista kantoaallost. (ABB 2000, 14 - 15.)

Kuvassa 19 on esitetty verhokäyrätekniikan periaate vierintälaakerin ulkokehävian havaitsemiseksi. Esityksessä asetetaan kaistanpäästösuodatin resonanssikohdan ympärille. Signaalin tasasuuntauksella ja demoduloinnilla puolestaan erotetaan impulssin vika- ja toistumistaajuus kantoaallost. Lopuksi demoduloidulle signaalille suoritetaan FFT- analyysi. Vikataajuuskomponenttien havaitaan erottuvan selvästi verhokäyräspektrissä. (ABB 2000, 15.)



Kuva 19. Verhokäyrätekniikan periaate. (ABB 2000, 15)

Peak Vue -menetelmää käytetään yleisesti metallisen kosketusten analysointiin. Tyypillisiä Peak Vue -menetelmän käyttökohteita ovat vierintälaakerit ja hammasvaihteet. Erityisenä käyttökohteena mainitsee Mikkonen (et al. 2009, 252) olevan hitaasti pyörivät laakerit. Menetelmä on kehitetty purskemaisen signaalin analysointiin, jossa aikatasosignaali mittaa asetuksen mukaisen määrän aikajaksoja. Jokainen aikajakso sisältää puolestaan absoluuttisen huippuarvon sen sisältämistä purskeista. Menetelmässä voidaan valita mitattava taajuuskaista ylipäästö- ja alipäästösuodattimien avulla. Menetelmä soveltuu käytettäväksi sekä matala- että korkeataajuisen värähtelyn mittauksissa. Kuvassa 20. on esitetty aikajaksoilla jaettu aikatasosignaali ja siitä muodostettava Peak Vue -aikatasosignaali. Huippuarvo on merkitty kuvaan kirjaimella A. (Mikkonen et al. 2009, 222, 252, 286.)

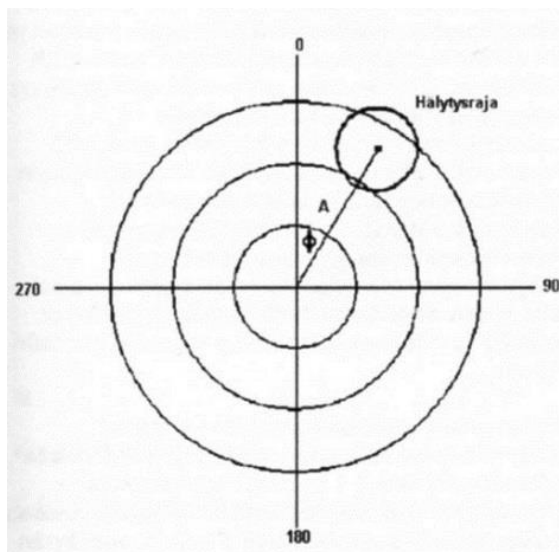


Kuva 20. Värähtelyn aikatasosignaali ja Peak Vue signaali. (Mikkonen et al. 2009, 222)

3.2.6 Vektori-, profiili- ja kepstrivalvonta

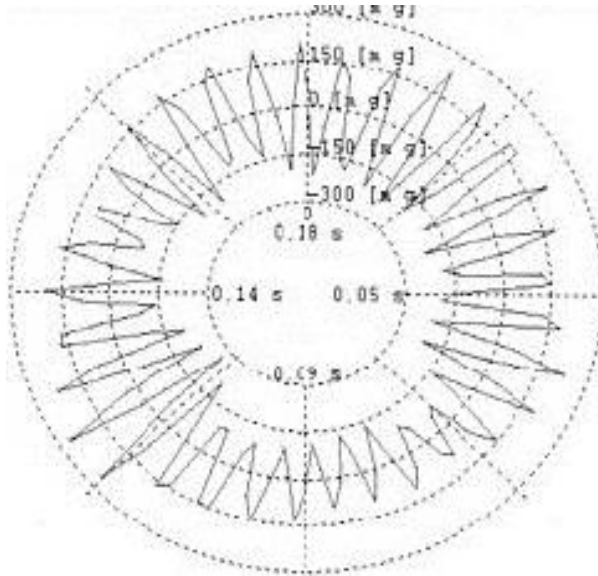
Standardi PSK 5706 määrittää vektorivalvonnan seuraavasti: *Vektorivalvon-
nalla seurataan pyörimistaajuisen tai sen monikerralla tapahtuvan värähtelyn
voimakkuuden A ja vaihekulman ϕ muodostamaa vektoria napakoordinaatis-
tossa.* Tyypillisimmin vektorivalvonnan käyttökohteita ovat tasapainotus, tasa-
painotilan valvonta, linjaustilanteen valvonta, akselin epäsymmetrisen lämpe-
nemisen havaitseminen ja roottorin poikittaisen särön havaitseminen. (Lumme
et al. 2013, 68; PSK 5706.)

Kuvassa 21. on esitetty käsite vektorivalvonta ja siinä käytettyjen suureiden
amplitudi A ja vaihekulma ϕ merkitys napakoordinaatistossa.



Kuva 21. Vektorivalvonta (Lumme et al. 2013, 68; PSK 5706)

Profiilivalvonnassa käytettävää mittausmenetelmää kutsutaan tahdistettuna
keskiarvostuksena aikatasossa. Saatava mittaustulos esitetään pyöreys- ja pi-
tuusprofiilina. Kuvassa 22. on kuvattu paperikoneen likaantuneesta keskitelas-
ta mitattu signaali, joka on esitetty pyörimiseen tahdistettuna aikatasosignaali-
na. (Mikkonen et al. 2009, 288; Lumme et al. 2013, 68; PSK 5706.)



Kuva 22. Profiilivalvonta esitettynä pyöreysprofiilina. (Mikkonen et al. 2009, 288)

Kepstrin määritetään standardissa PSK 5701 tarkoittavan logaritmisen tehospektrin Fourier -muunnoksen neliötä (Lumme et al. 2013, 10; PSK 5701). Tyypillinen kepstrivalvontakohte on hammasvaihde. Valvontamenetelmässä tarkkaillaan käynnin aikana muodostuvan logaritmisen amplitudispektrin säännöllisyyksiä. Kepstrillä valvottavia ovat amplitudit, jotka esiintyvät esimerkiksi harmonisilla ja sivunauhataajuuksilla. (Lumme et al. 2013, 70; PSK 5706.)

3.2.7 Korkeataajuisen värähtelyn valvontamenetelmät

Tässä luvussa käsitellään lyhyesti joitakin käytössä olevia korkeataajuisen värähtelyn mittausmenetelmiä. Osa mittausmenetelmistä sopii sekä matalataajuisen, että korkeataajuisen värähtelyn mittaamiseen. Standardin PSK 5706 mukaan korkeataajuiset valvontamenetelmät käsittävät yli 20 kHz:n alueen (Lumme et al. 2013, 69; PSK 5706). 20 kHz:n alueelta ylöspäin käytettäviä yleisimpiä valvontamenetelmiä ovat ultraäänimittaukset kappaleen pinnasta, iskusysäysmittaus, akustinen emissio, SEE® (Spectral Emitted Energy). Lisäksi korkeataajuisiin valvontamenetelmiin lukeutuvat verhoikäyrämenetelmä ja PeakVue™, joita käsiteltiin jo aiemmin tämän opinnäytetyön luvussa 3.2.5. Korkeataajuisen värähtelyn mittaaminen vaatii käytettävältä mittausketjulta

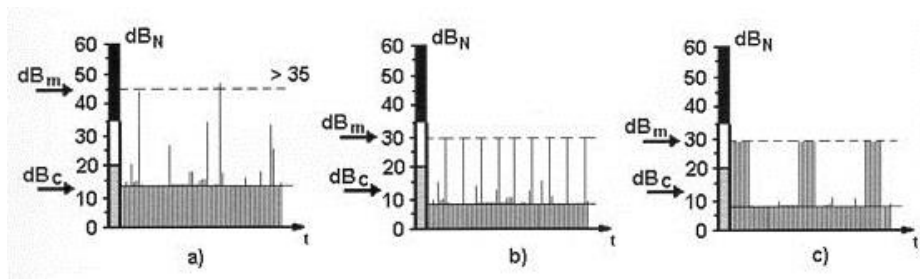
suurta herkkyyttä. Johtuen alhaisesta värähtelyn energiasta on häiriösuojausten ja signaali-kohinasuhteen oltava hyvä. (Mikkonen et al. 2009, 247 - 248.)

3.2.7.1 Ultraäänimittaus kappaleen pinnasta

Standardi PSK 5706 määrittää ultraäänimittauksen tapahtuvan stetoskooppi-tyyppisellä mittalaitteella. Ultraäänikuuntelu perustuu mittaaajan kykyyn tunnistaa äänien mukaan erilaisia ilmiöitä. Laitteella voidaan saada myös tunnusluvalvonnan lukuarvo käyttämällä resonanssityyppistä pietsosähköistä anturia. (Lumme et al. 2013, 70; PSK 5706.) Ultraäänimittauksessa mitataan koetimella laitteen rungosta 20 - 100 kHz:n taajuusalueella tapahtuvaa värähtelyä muuttamalla se ihmiskorvan kuultavaksi 2 kHz:n kuuloalueella. Ultraäänimittauksista voidaan käyttää rinnakkain kappaleen 3.2.7.2 iskusysäysmenetelmän kanssa, koska ne kattavat saman taajuusalueen. Iskusysäysmenetelmän taajuusalue on 32 kHz. Tyypillisimmin havaittavia vikaantumistapoja ultraäänimittauksella ovat kavitaatio, laakerivauriot, osien hankaaminen toisiinsa ja puutteellinen voitelu. (Mikkonen et al. 2009, 249 - 250.)

3.2.7.2 Iskusysäysmenetelmä

Menetelmästä käytetään myös englannin kielen sanoista muodostuvaa lyhennettä SPM (Shock Pulse Method). Iskusysäysmittauksesta löytyy määrittäys suomalaisesta standardista PSK 5706. Mittauksessa käytettävä resonanssityyppinen pietsosähköinen anturi mittaa värähtelyä 32 kHz:n taajuudella. Mittauksessa määritettäviä suureita ovat huippuarvo db_m ja pohjakohinan taso db_c , josta käytetään myös nimitystä mattotaso. Mattoarvo on käytännöllinen suure arvioitaessa mm. laakerin voitelutilaa. Iskusysäysmenetelmä on kehitetty vierintälaakereiden kunnonvalvontaan, jossa otetaan huomioon kehänopeus akselin pyörimisnopeuden ja halkaisijan avulla. (Lumme et al. 2013, 70; PSK 5706; Mikkonen et al. 2009, 20, 249.) Kuvassa 23 on esitetty laakerin iskusysäyskuviot tilanteissa, joissa kyseessä on a) vaurioitunut laakeri, b) toisiinsa iskevät osat ja c) toisiaan hankaavat osat (Mikkonen et al. 2009, 249).



Kuva 23. Tilanteiden a-c iskusysäyskuviot. (Mikkonen et al. 2009, 249)

3.2.7.3 Akustinen emissio

Akustista emissiota tarkoitetaan myös alan kirjallisuudessa esiintyvällä englannin kielestä muodostuvalla lyhenteellä AE (Acoustic Emission) (Mikkonen et al. 2009, 19, 250, 566). Akustinen emissio määritetään standardissa PSK 5706 jännitysaaltoina, jotka aiheutuvat paikallisesta jännitysenergian vapautumisesta. Aaltoja esiintyy laajalla taajuuskaistalla. Akustisen emission mittaus suoritetaan yleensä yli 50 kHz:n alueella, jossa pinta-aaltojen osuus on suhteessa suurempi ja ominaisvärähtelyn osuus vastaavasti pienempi. Mitattaessa akustista emissiota käytetään anturina resonanssityyppistä pietsosähköistä anturia. Mittauksessa parannetaan signaalin laatua suodattamalla pois resonanssitaajuuden ulkopuoliset taajuuskomponentit. (Lumme et al. 2013, 70; PSK 5706.)

3.2.7.4 SEE® menetelmä

Tästä kaupallisesta menetelmästä käytetään lyhennettä SEE (Spectral Emitted Energy). SEE -menetelmä perustuu 250 - 350 kHz:n taajuusalueella esiintyvän värähtelyn mittaamiseen. Mittaustulos ilmoitetaan SEE -yksiköissä. Menetelmällä havaittavat vikaantumistavat ovat jaksollisia. Tällaisia vikaantumistapoja ovat mm. laakerivauriot, puutteellinen laakereiden voitelu, kavitaatio ja pyörivien osien koskettaminen toisiinsa. (Mikkonen et al. 2009, 252.)

3.3 Laakerien vikadiagnostiikka

Luvussa 3.2 käsiteltiin jo joiltakin osin mittaustulosten perusteella diagnosoitavissa olevia vikoja. Diagnosoinnin käsittely mittausten menetelmien tarkastelun yhteydessä helpottaa mittaustekniikan ymmärrettävyyttä. Tässä luvussa käsitellään tarkemmin pyörivien koneiden laakerivärähtelyn mittaustuloksiin perustuvaa vianmäärittystä. Suomalainen standardi PSK 5707 käsittelee värähtelymittauksen vianmäärittystä. Tähän standardiin viitataan useissa tämän kappaleen kohdissa. Laakerivikojen diagnosointia käsitellään kiihtyvyysanturilla tehtävin mittausten menetelmin, josta saatavia tuloksia tarkastellaan aika- ja taajuustasossa. Laakeriviat ovat havaittavissa myös korkeataajuisilla mittausten menetelmillä, jollaisia ovat mm. akustinen emissio, verhoikäyrä- ja iskuenergiamenetelmä. (Lumme et al. 2013, 86; PSK 5707.) Samassa yhteydessä on todettava, että liukulaakereiden vikaantumiset ovat usein melko vaikeasti havaittavissa pelkästään kiihtyvyysanturilla tehtävillä mittauksilla (Mikkonen et al. 2009, 316; PSK 5707).

3.3.1 Värähtelyn vaikutus laakereihin

Onnistuneella linjauksella ja hyvällä tasapainotuksella pystytään minimoimaan koneeseen kohdistuvia värähtelyjä. Koneen alhaisella värähtelytasolla pidennetään sen käyttöikää ja yksittäisten koneen komponenttien uusinnan tarve vähenee. Itse värähtely ei ole suoranaaisesti koneen vikaantumista aiheuttava tekijä, vaan värähtelyn aiheuttamat voimat eli herätteet. Värähtely ja sen aiheuttamien voimien vaikutus on vain yksi koneen kestoikään vaikuttava tekijä. Tarkasteltaessa puolestaan koneen laakeroinnin kestoikään vaikuttavia tekijöitä, voidaan todeta, että siihen vaikuttavat mm. laakerikuormitukset, puhtaus, voitelu, pyörimisnopeus, vällykset, lämpötila, sovitteet ja toleranssit. Esimerkiksi epäonnistuneen linjauksen ja epätasapainon vaikutus laakerien eliniän odotukseen on merkittävä, koska ne kasvattavat laakeriin kohdistuvaa kuormitusta. (Kautto. 2011.)

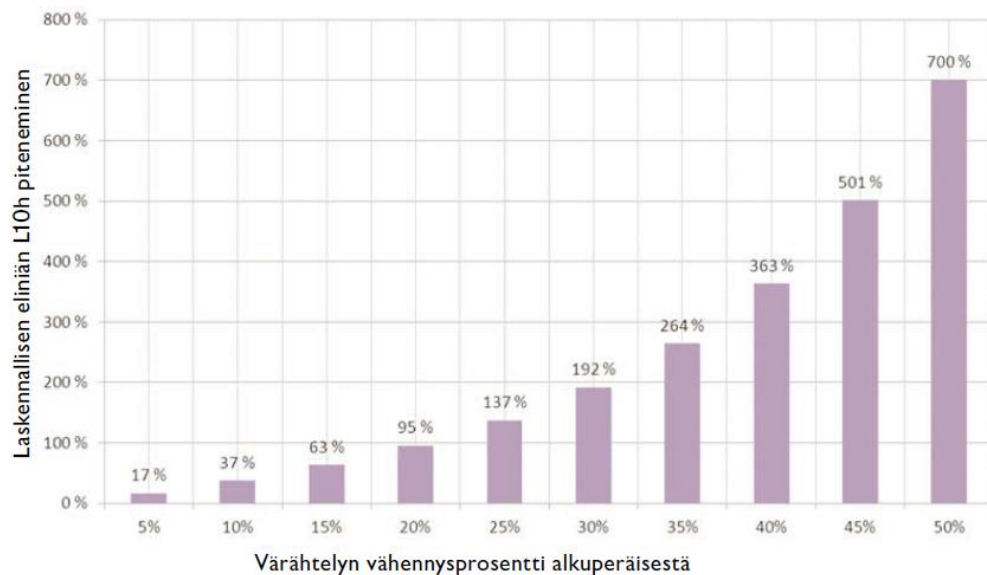
Hieman laakerityypistä riippuen, kuormituksen kasvu alentaa laakerin laskennallista elinikää vähintään kolmanteen potenssiin. Jos voidaan olettaa muiden

olosuhteiden pysyvän muuttumattomina, on laakeriin vaikuttavien voimien vaikutus kestoikään tarkasteltavissa matemaattisesti kaavalla 5. (Kautto. 2011.)

$$L_{10} = (C/P)p \quad (5)$$

jossa	C	Dynaaminen kantavuusluku
	P	Laakeriin vaikuttava dynaaminen ekvalenttikuorma
	p	Laakerityypistä riippuva vakio (3 kuulalaakereille ja 10/3 muille laakerityypeille)

Myös värähtelytason alenemisen vaikutus laakerin elinikään on laskettavissa. Kuvasta 24 on havaittavissa, että 5 % värähtelytasoa alentamalla saadaan laskennallista elinikää L_{10} kasvatettua 17 %. Ja mikäli värähtelytaso alenee 50 %, on vaikutus elinikään jopa 700 %. (Kautto. 2011.)

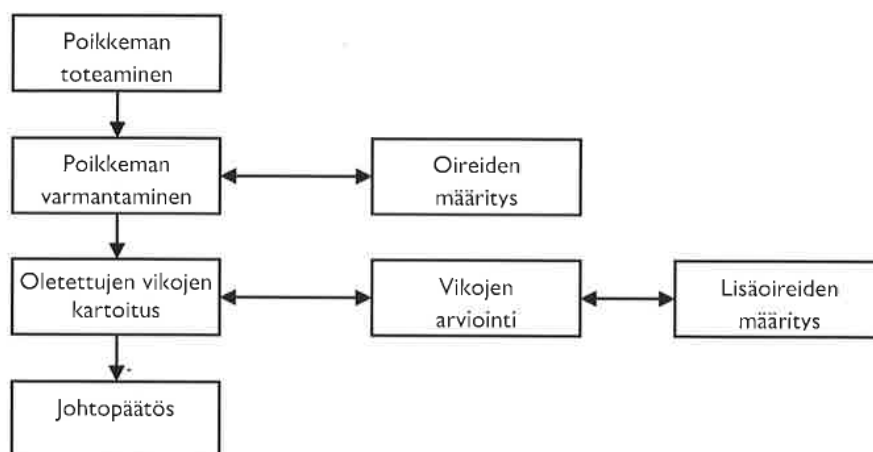


Kuva 24. Värähtelytason alenemisen vaikutus laakerin kestoikään. (Kautto. 2011)

3.3.2 Vianmääritys

Vianmääritys on tapahtumaketju, joka käynnistetään havaittaessa laitteen toimivan normaalista poikkeavalla tavalla (Mikkonen et al. 2009, 290). Vianmääritys ei tapahdu ainoastaan värähtelymittauksen tietojen perusteella, vaan sii-

nä käytetään hyväksi myös aistihavaintoja, laitehistoriaa, käyttöolosuhdetietoja ja muiden mittausten avulla saatavaa informaatiota. Vianmääritys on monivaiheinen tapahtuma. Itse vika ei ole välttämättä yksittäinen havaittavissa oleva ilmiö, vaan siihen saattaa liittyä useita eri tekijöitä. Sama oire voi liittyä erilaisiin vikoihin ja vastaavasti yhteen vikaan voi liittyä useampi oire. Vianmäärityksessä pyritään sulkemaan pois epätodennäköisiä vikoja ja varmistamaan laitteessa esiintyvän vian todennäköisiä syitä. Vikaantumisesta muodostetaan lopulta varmentamisen, kartoituksen ja arvioiden perusteella johtopäätös. Standardissa PSK 5707 esitetään vianmäärityksen kulku kuvan 25 mukaisella kaaviolla. (Mikkonen et al. 2009, 290; Lumme et al. 2013, 74; PSK 5707.)



Kuva 25. Vianmäärityksen kulku. (Mikkonen et al. 2009, 290; PSK 5707)

Vianmäärityksellä selvitetään, aiheutuuko laitteessa esiintyvä normaalista poikkeava toiminta ulkoisesta syystä vai onko se vian aiheuttama. Samalla tulee arvioida mahdollisen vian vakavuus, käytön jatkamisen mahdollisuus ja tarkoituksenmukaisuus. Päätöksenteossa ja arvioinnissa on huomioitava erityisesti käyttöturvallisuus. (Mikkonen et al. 2009, 290.)

Luvussa 3.2 käsiteltyjen värähtelyn mittausmenetelmien tunteminen luo hyvän perustan pyörivien laitteiden kunnonvalvonnalle. Mittausarvoihin perustuva hälytysraja- ja trendiseuranta on käytettävissä tallennettujen mittaustietojen avulla. Pelkästään aistihavaintoihin perustuva vikaindikaatio ei ole riittävän tehokas tapa valvoa laitteen toimintakuntoa. Vianmäärityksessä on kuitenkin huomioitava, että yksittäinen hälytysrajan ylittävä värähtelymittaus ei ole riittävä indikaatio viasta. Sen saattaa aiheuttaa mittausvirhe, olosuhdetekijän muutos

mittauksessa tai mitattavan laitteen toiminnassa. Mittaustulos varmennetaan uusintamittauksin ja myös sen yhdenmukaisuutta aiempien mittauksien käyttöolosuhteisiin tulee tarkastella. (Mikkonen et al. 2009, 290 - 291.)

Värähtelymittauksien vianhaun tueksi on luotu erilaisia taulukoita. Esimerkiksi Mikkosen (et al. 2009, 588) kirjoittamassa teoksessa on julkaistu useampi vianhakutaulukko. Yksi tällainen vianhakutaulukko on tämän opinnäytetyön liitteenä 1. Se on tarkoitettu avustamaan pumppujen vianhakua spektrin avulla.

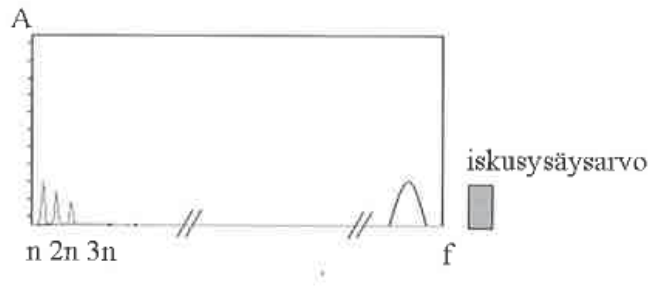
3.3.3 Vierintälaakerin vikojen tunnistaminen

Vierintälaakereilla on todettu olevan tyypillisiä vikaantumisvaiheita. Vika kehittyy yleensä näiden vaiheiden kautta. Värähtelymittauksilla kyetään tunnistamaan jopa 90 % laakerivaurioista ennen laakerin tuhoutumista. Yleensä vierintälaakereiden vikojen kehittyessä myös niiden oireet vahvistuvat ja oireiden määrä lisääntyy. Lopulta vika voi kehittyä niin vakavaksi, että se aiheuttaa laakerin tuhoutumisen ja akselivaurion. Laakerivaurion aiheuttamien iskujen voimakkuus saattaa olla joskus vaikeasti havaittavissa. Usein laite itsessään aiheuttaa suurempaa mittauksessa todennettavaa värähtelyä, kuin alkava laakerin vikaantuminen. Aika- ja taajuustasossa tarkasteltaessa laakerivika erottuu selkeämmin vasta sen aiheuttamien herätteiden vahvistuttua. (Lumme et al. 2013, 86; PSK 5707; Mikkonen et al. 2009, 311.) Kappaleissa 3.3.3.1 - 3.3.3.4 on tarkasteltu standardin PSK 5707 mukaan yleisesti aika- ja taajuustasoesityksessä havaittavia vierintälaakerivikoja.

3.3.3.1 Metallikosketus ja voiteluviat

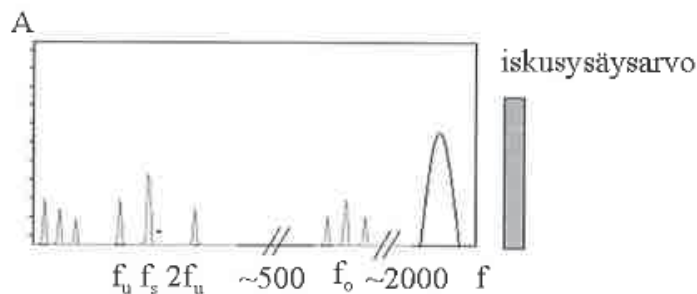
Metallikosketus aiheuttaa tyypillisesti yli 2000 Hz:n korkeataajuisia värähtelyä. Vierintälaakerin metallikosketuksessa ilmenee väljyyden salliman liikevaran loppuessa aikatasosignaalin tyypistymistä ja spektriin muodostuvia herätteiden monikertoja. Metallikosketuksen aiheuttajia voivat olla virheellinen asennus, liiallinen kuormitus tai riittämätön voitelu. (Lumme et al. 2013, 86; PSK 5707;

Mikkonen et al. 2009, 312.) Kuvassa 26 on esitetty metallikosketuksen tyyppillinen spektri, jossa n tarkoittaa laitteen pyörimisnopeutta vastaavaa taajuutta.



Kuva 26. Vierintälaakerin metallikosketus. (Mikkonen et al. 2009, 312; PSK 5707)

Vierintälaakerin voiteluaineen likaannuttua esiintyy spektrissä ominaistaajuusalueella amplitudiarvon piikkejä. Näiden piikkien erotus vastaa kappaleessa 3.3.3.2 esitetyn kaavan 9 laakerin pitimen taajuutta f_p . Tarkasteltaessa spektriä on myös otettava huomioon, että sysäystaajuuksilla esiintyvä värähtely ei aina ilmaise laakerivikaa, vaan se saattaa olla seuraus laakerin virheellisestä asennuksesta tai liiallisesta kuormituksesta. (Lumme et al. 2013, 86 - 87; PSK 5707; Mikkonen et al. 2009, 312.) Kuvassa 27 on kuvattu liiallisen kuormituksen tai virheellisen asennuksen aiheuttamia piikkejä sysäystaajuuksilla.

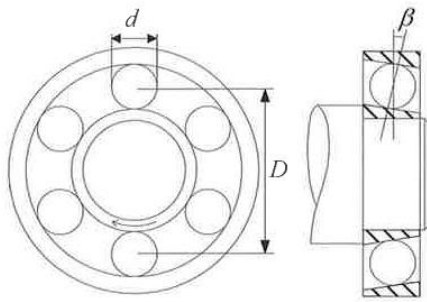


Kuva 27. Värähtely sysäystaajuuksilla. (Mikkonen et al. 2009, 312; PSK 5707)

Kuvassa 27 esiintyvä taajuusarvo f_0 tarkoittaa ominaistaajuutta. Taajuusarvo f_u puolestaan tarkoittaa laakerin ulkokehän ohitustaajuutta ja f_s laakerin sisäkehän ohitustaajuutta. Ohitustaajuuksien laskentakaavat on esitetty laakerikomponenttien vikaa käsittelevässä kappaleessa 3.3.3.2.

3.3.3.2 Laakerikomponenttien viat

Laakerikomponenteilla tarkoitetaan laakerin ulkokehää, sisäkehää, vierintäelintä (kuula tai rulla) ja pidikettä. Tarkasteltaessa laakerikomponenttien vikoja on selvitettävä kyseisen laakerin ohitus- ja vikataajuudet. Mikäli ohitus- ja vikataajuuksien arvoja ei ole valmiiksi käytettävissä laakerivalmistajan taulukoista, voidaan ne selvittää laskemalla kaavojen 6 - 9 avulla. Laskentaa varten on selvitettävä valmistajan laakeritietokannasta kuvassa 28 esitettyjen suureiden arvot. (Mikkonen et al. 2009, 312 - 313; Lumme et al. 2013, 87; PSK 5707.)



Kuva 28. Laakerikomponenttien laskennassa esiintyvien suureiden merkitykset (Mikkonen et al. 2009, 313)

Kuvassa 28 esitetyt suureet ovat yksittäisen vierintäelimen halkaisija d , vastakkaisten vierintäelinten keskikohdasta mitattu laakerin halkaisija D ja vierintäelimen pesän kulma β . (Mikkonen et al. 2009, 313.)

Ulkokehän ohitustaajuus:

$$f_u = BPFO = \frac{N}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \beta\right) n \quad (6)$$

Sisäkehän ohitustaajuus:

$$f_s = BPFI = \frac{N}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \beta\right) n \quad (7)$$

Vierintäelimen ohitustaajuus:

$$f_v = BSF = \frac{D}{2d} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \cos \beta\right)^2\right] n \quad (8)$$

Pitimen vikataajuus:

$$f_p = FTF = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \beta \right) n \quad (9)$$

Laskentakaavoissa esiintyvä suure N tarkoittaa vierintäelinten lukumäärää. Suure n puolestaan tarkoittaa akselin pyörimistaajuutta tilanteessa, jossa ulkokehä ei pyöri. Mikäli ulkokehä ja sisäkehä ovat molemmat pyöriviä, tällöin n tarkoittaa ulko- ja sisäkehän välistä suhteellista pyörimisnopeutta. (Mikkonen et al. 2009, 313.)

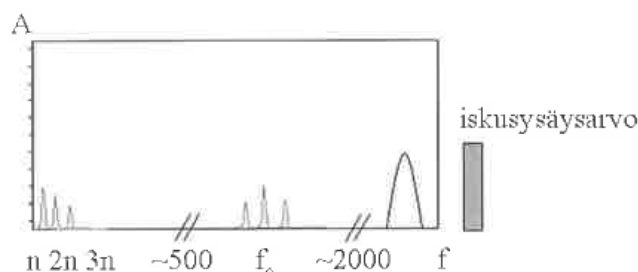
Laakerivalmistajat ilmoittavat yleensä vikataajuudet valmiissa taulukoissa. Mikäli laakerista ei ole saatavissa komponenttien vikataajuustietoa tai geometriatietoja, voidaan laskenta suorittaa tavanomaisen laakerigeometrian mukaisesti. Yleiseen laakerigeometriaan perustuva vika- ja ohitustaajuustiedot voidaan laskea käyttämällä kaavoja 10 - 12. Tapauksissa, joissa vierintäelinten lukumääräkään ei ole tunnettu, voidaan sen arvioida olevan yhdeksästä yhteentoista kappaletta. (Mikkonen et al. 2009, 313.)

$$f_p = 0,4n \quad (10)$$

$$f_u = 0,4n \times N \quad (11)$$

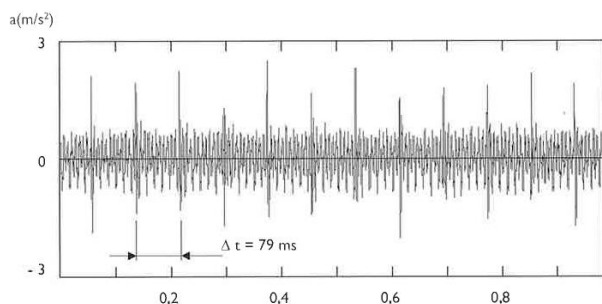
$$f_p = 0,6n \times N \quad (12)$$

Vierintäpinnalla esiintyvä paikallinen vika ilmenee tyypillisesti laakerin osien ominaistaajuuksia f_0 vastaavilla alueilla. Yleisesti tämän taajuusalueen voidaan todeta asettuvan välille 500 - 2000 Hz. (Mikkonen et al. 2009, 314; Lumme et al. 2013, 87; PSK 5707.) Kuvassa 29 on kuvattu yksittäisen laakerivaurion tai riittämättömän voitelun muodostamista huipuista taajuustasoesityksessä.



Kuva 29. Yksittäinen laakerivaurio tai riittämätön voitelu. (Mikkonen et al. 2009, 314; PSK 5707)

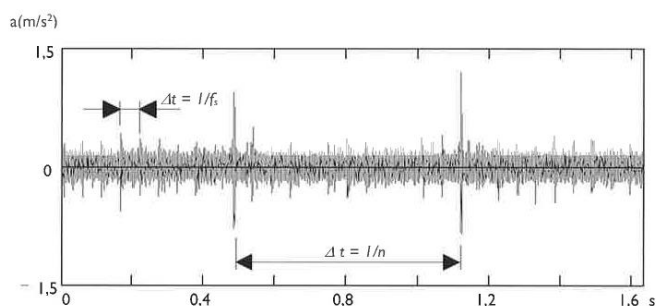
Ulkokehän vika on havaittavissa sysäystaajuudella ja sen monikerroilla. Ulkokehällä oleva vika esiintyy voimakkaampana värähtelynä kuin sisäkehällä sijaitseva vika. Laakerin ulkokehällä oleva vaurio ilmenee iskusysäyksenä, jonka aiheuttaa vierintäelimen osuma ulkokehällä sijaitsevaan vauriokohtaan. Myös vierintäelimen epäjatkuvuuskohdan isku kehään voi olla syynä iskusysäykseen. Kuvassa 30 on kuvattu tyypillinen aikatasoesityksestä havaittava laakerin ulkokehävaurio. (Mikkonen et al. 2009, 314; Lumme et al. 2013, 87 - 88; PSK 5707.)



Kuva 30. Aikatasosignaali ulkokehältään vaurioituneesta laakerista (Mikkonen et al. 2009, 314; Mikkonen 1995)

Viat laakerien vierintäradoilla esiintyvät tyypillisesti aiemmin, kuin vierintäelimen tai pitimen viat. Ulko- ja sisäkehien sysäystaajuudet ovat näin ollen havaittavissa myös värähtelymittauksissa aiemmin. Vikaantumisen edetessä pitimen vikaantumistaajuus puolestaan ilmenevät usein toisen taajuuden sivunauhoina. Ulkokehävika aiheuttaa voimakkaampaa värähtelyä mittauksissa, kuin sisäkehävika. Tämä johtuu siitä, että mittausanturi kiinnitetään laitteen runkoon lähelle laakeripesää. Anturi on tällöin myös lähempänä ulkokehää ja sen vikaantumisen aiheuttamat signaalit ovat myös vastaavasti voimakkaam-

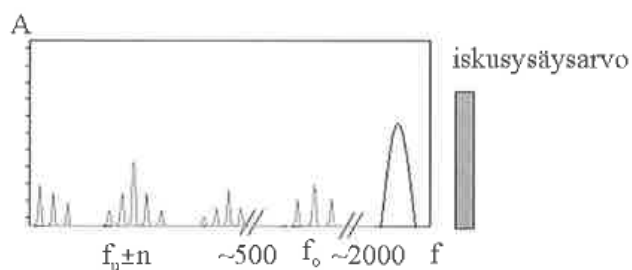
pia. Ulkokehän ja anturin välissä on vähemmän signaalia heikentäviä rajapintoja. Tämä ilmiö on todettavissa myös kuvan 31 sisäkehältäään vaurioituneen laakerin aikatasosignaalista. Verrattaessa tätä signaalia kuvan 30 ulkokehävaurion aikatasosignaaliin voidaan todeta, että signaalin voimakkuudessa on selvästi havaittavissa oleva ero. (Mikkonen et al. 2009, 314 - 315.)



Kuva 31. Aikatasosignaali sisäkehältäään vaurioituneesta laakerista (Mikkonen et al. 2009, 315; Mikkonen 1995)

3.3.3.3 Kehien kuluminen

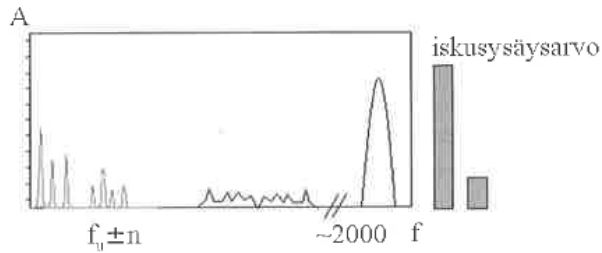
Laakerivaurion edetessä myös sysäystaajuuksien monikertojen määrä lisääntyy. Mittauksissa on havaittavissa sivunauhoja enenevissä määrin sysäystaajuuksien ja ominaistaajuuksien ympäristössä (Lumme et al. 2013, 88; PSK 5707.) Kuvassa 32 on kuvattu kehien lisääntynyttä kulumista kuvaava taajuustasoesitys.



Kuva 32. Kehien kulumisen spektri (Mikkonen et al. 2009, 315; PSK 5707)

Vaurion edetessä laakerin mittausspektrin amplitudi kasvaa pyörimistaajuudella ja sen monikerroilla. Lähellä lopullista vaurioitumista spektri piikit voivat lähes hävitä ja iskusysäysarvot laskea ja niiden tilalla on havaittavissa laajakaisista värähtelyä. Iskusysäysarvot laskevat kuitenkin vain väliaikaisesti. Juuri

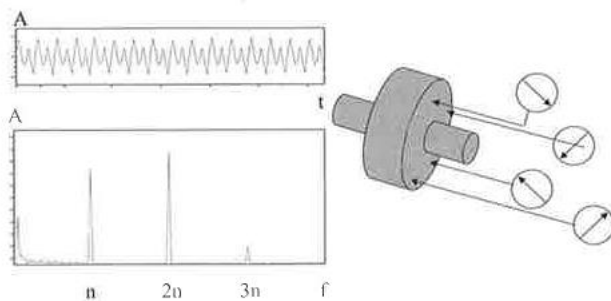
ennen lopullista vaurioitumista iskusysäysarvot kasvavat huomattavan suuriksi. (Mikkonen et al. 2009, 316; Lumme et al. 2013, 88; PSK 5707.) Kuvassa 33 on esitetty spektri, jossa laakeri on lähellä lopullista vaurioitumista.



Kuva 33. Lopullista vaurioitumista lähellä olevan laakerin spektri (Mikkonen et al. 2009, 315; PSK 5707)

3.3.3.4 Vinoon asennettu laakeri

Jos laakerin asennus on epäonnistunut, ja se on asettunut vinossa laakeripesään, aiheutuu akselin suuntaista värähtelyä. Tämä värähtely tapahtuu pyörimistaajuudella. Värähtelyn aikatasosignaali on havaittavissa vastakkaisilla sivuilla kuvassa 34 esitetty 180 asteen vaihe-ero, joka johtuu kiertyvästä liikkeestä. (Lumme et al. 2013, 89; PSK 5707.)

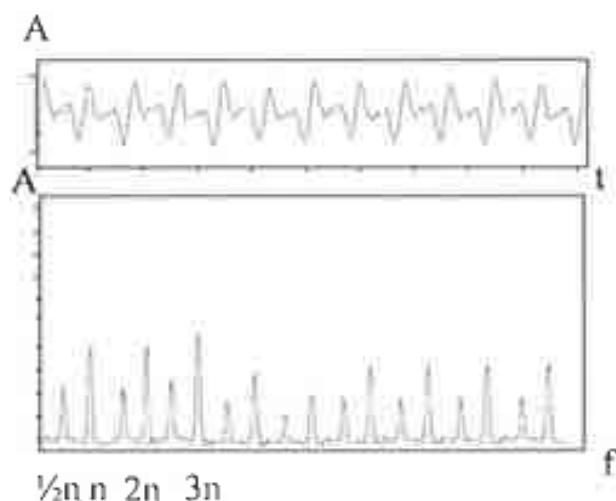


Kuva 34. Spektri vinoon asennetusta laakerista (Mikkonen et al. 2009, 316; PSK 5707)

3.3.4 Liukulaakerin vikojen tunnistaminen

Kuten jo kappaleessa 3.3 mainittiin, liukulaakerin vikojen tunnistaminen ainoastaan kiihtyvyysanturilla suoritetuin värähtelymittauksin on vaikeaa. Standardissa PSK 5707 todetaan tyypillisten liukulaakerivikojen olevan kulumis- ja vällysongelmia. Yleisesti liukulaakerivikojen aiheuttajia ovat puutteellinen voitelu sekä väärän tyyppisellä tai epäpuhtaalla öljyllä toteutettu voitelu. Myös suunnittelu- ja asennusvirheet aiheuttavat liukulaakereiden vikoja. (Lumme et al. 2013, 89; PSK 5707.)

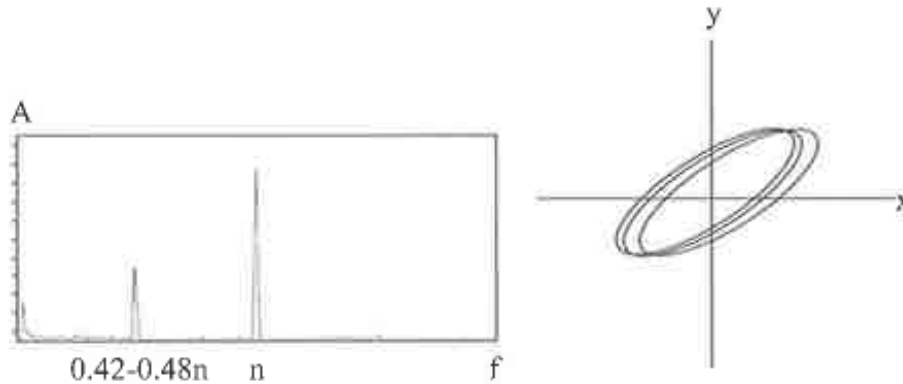
Kulumis- ja vällysongelmat ilmenevät normaalisti pyörimistaajuuden monikertojen ja aliharmonisten komponenttien kasvuna. Värähtelyspektrissä kulumis- ja vällysongelmat muodostavat yleisesti kohonneen kohinatason, joka esitetään kuvassa 35. (Mikkonen et al. 2009, 316; PSK 5707.) Kuvassa 35 ylempi kuvaaja esittää muodostuvan värähtelyn aikatasossa ja alempi kuvaaja vastaa-vasti taajuustasossa.



Kuva 35. Kulumis- ja vällysongelma liukulaakerissa. (Mikkonen et al. 2009, 317; PSK 5707)

Toinen liukulaakereissa havaittava ongelma on öljykalvon pyörteily. Pyörteily voi esiintyä myös ominaispyörteilynä. Öljykalvon pyörteilyä käytetään englanninkielistä termiä oil whirl. Öljykalvon pyörteilyä esiintyy pääsääntöisesti lie-riömäisissä liukulaakereissa. Kyseisten liukulaakereiden kohdalla voi syntyä tilanne, jossa akselin epäkeskisyys laakeriholkissa on riittämätön. Tästä on seurauksena liian alhainen hydrodynaamisen paineen muodostuminen voite-

luainekalvoon. Käytettävälle laitteelle öljykalvon pyörteily on ilmiönä vaarallinen, koska se voi johtaa liukupintojen kosketukseen. Kuvassa 36 on esitetty öljykalvon pyörteilystä muodostuva värähtelyspektri. Kuvasta voidaan myös havaita ilmiön esiintymisalue $0,42n - 0,48n$. Esiintymisalueen merkintä tarkoittaa $0,42 - 0,48$ osaa akselin pyörimistaajuudesta. (Mikkonen et al. 2009, 317.)



Kuva 36. Öljykalvon pyörteilyn spektrimittaustulos (Mikkonen et al. 2009, 317; PSK 5707)

Öljykalvon ominaispyörteilystä käytetään englanninkielistä termiä oil whip. Mikkonen (et al. 2009, 317) luonnehtii ominaispyörteilyä lauseella: *Kun pyörimistaajuus kasvaa hieman yli kaksi kertaa roottorin taivutusominaisuuden, pyörteily saattaa lukittua ominaistaajuuteen eikä enää ylitä sitä.*

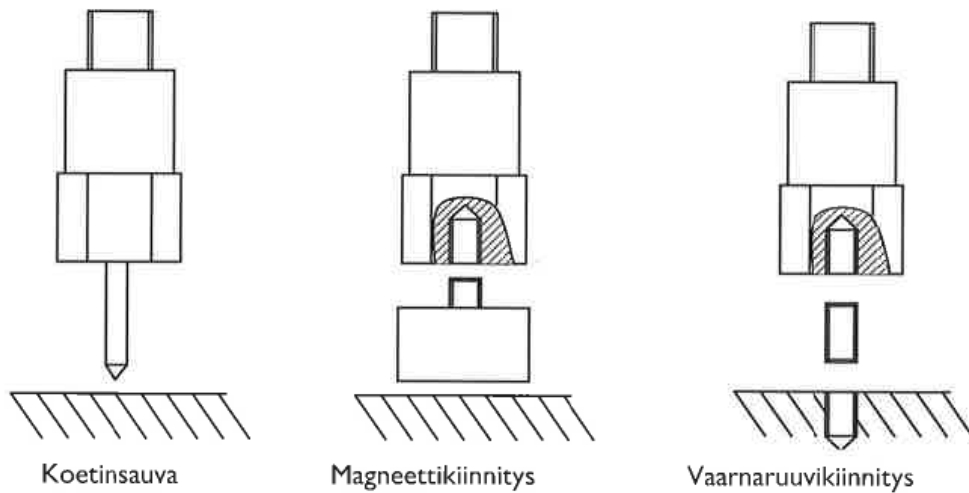
3.4 Mittaustoiminta

Tässä kappaleessa käsitellään mittaustoimintaa ja sen toteuttamista kiihtyvyyssanturilla. Lähestymistapa on luonteva, johtuen opinnäytetyön tilaajan mittalaitteen ominaisuuksista. VL Turvalla on käytössä kiihtyvyyssanturilla varustettu FAG Detector III -mallinen kannettava mittalaite. Kiihtyvyyteen perustuva mittausta on yleisin käytetty mittaussuure (Mikkonen et al. 2009, 266). Kiihtyvyyssmittauksissa mittaussuure muunnetaan yleensä nopeudeksi (Lumme et al. 2013, 26; PSK 5703).

3.4.1 Mittausanturi ja mittauspiste

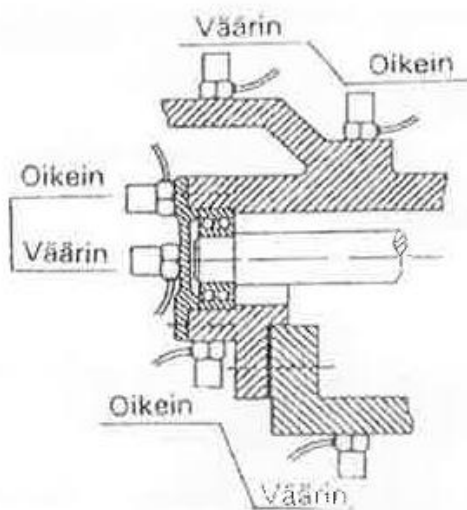
Kiihtyvyyssanturia käytetään absoluuttisen värähtelyn mittaukseen. Sitä voidaan käyttää parhaimmillaan laajalla mekaanisen värähtelyn taajuusalueella (0-20 kHz). Mittausanturi valitaan arvioiden sen soveltuvuutta suhteessa ympäristöön mittausolosuhteisiin. Valintaan vaikuttavia ympäristöolosuhteita ovat mm. käytettävissä oleva tila, lämpötila, likaisuus, kosteus ja mahdolliset sähkömagneettiset häiriöt. Tämän lisäksi arvioidaan mitattavien laitteiden värähtelyn voimakkuutta, koska anturin mittausaluetta ei saa ylittää. Herkkyydeltään 100 mV/g anturilla mittausalue on noin +/- 50 g. Mikäli värähtelyn voidaan etukäteen arvioida olevan tätä voimakkaampaa, tulee käyttää vähemmän herkkää anturia tai mekaanista suodatinta mittauspisteen ja anturin välillä. Myös mittauksissa käytettävän liitimen valinnassa tulee käyttää samoja ympäristöolosuhteisiin perustuvia kriteereitä, kuin anturin valinnassakin. (Lumme et al. 2013, 26-27; PSK 5703.) VL Turvalla on käytössä herkkyydeltään 100 mV/g anturi (Schaeffler Group 2011, 258).

Anturin kiinnitystavalla on huomattava vaikutus mittauksen tarkkuuteen. Kannettavalla laitteella suoraan mittauspintaan asetettavan anturin kiinnitys tapahtuu tyypillisesti magneetin avulla. Mikäli mittauspiste ei ole ferromagneettinen, on mittaus suoritettava käsin anturista kiinni pitämällä. Käsin kiinni pidettynä anturin mittausherkkyys kuitenkin kärsii ja tämä on otettava huomioon tarkasteltaessa mittaussignaalia. Käsin kiinni pidettynä tehty mittaus vastaa koetinsauvamittausta. Vaarnaruuvi- ja nippakiinnitys ovat myös tavanomaisia anturin kiinnitystapoja. Vaarnaruuvikiinnitystä voidaan pitää luotettavana ja mittauksloksen kannalta hyvänä kiinnitystapana. (Lumme et al. 2013, 28 - 33; PSK 5703; Mikkonen et al. 2009, 267.) Kiinnitystapa vaikuttaa Mikkosen (et al. 2009, 267) mukaan mittausaluetta rajoittavasti, ylärajataajuuden ollessa koetinsauvalla 500 Hz, magneettikiinnityksellä 1 - 2 kHz ja vaarnaruuvikiinnityksellä aina anturinvalmistajan ilmoittamaan maksimitaajuuteen. Kuvassa 37 on esitetty erilaisia anturin kiinnitystapoja.



Kuva 37. Anturin kiinnitystapoja. (Mikkonen et al. 2009, 267)

Mittauspisteen valinta suoritetaan laitekohtaisesti. Tavoitteena on tehdä mitaus siten, että värähtelyn lähde ja anturi ovat mekaanisesti mahdollisimman lähellä toisiaan. Etenkin korkeataajuinen värähtely menettää osan energias-
taan aina kohdatessaan rajapinnan. Tästä johtuen anturi pyritään kiinnittä-
mään mahdollisimman lähelle laakeripesää. Koska pyörivissä laitteissa väräh-
tely siirtyy laakerien kautta runkoon, mittaus tehdään laakeripesän kohdalta
säteissuunnassa sekä tarvittaessa akselin suunnassa. (Lumme et al. 2013,
21; PSK 5702.) Kuvassa 38 esitetään mittausanturin oikeat kiinnityspaikat vie-
rintälaakerin pesään nähden.



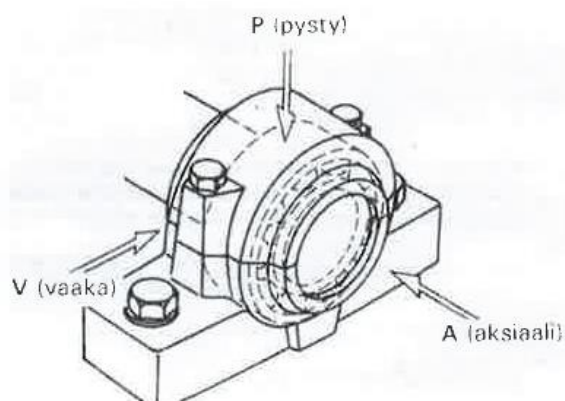
Kuva 38. Mittauspisteen valinta. (Lumme et al. 2013, 21; PSK 5702)

Mittaustoimintaa aloittaessa mittauspaikat ja -pisteet tulee merkitä asianmukaisesti. Mittauspaikalla tarkoitetaan koneikon osaa tai laitetta, josta mittaukset tehdään. Mittauspaikka voi sisältää useita mittauspisteitä. Mikäli yhdessä koneessa on useita mittauspisteitä, tulee ne merkitä numeroiden voimansiirron kulkusuunnan mukaisessa järjestyksessä. Anturin kiinnityspaikka eli mittauspiste merkitään laitteeseen selkeästi havaittavalla merkinnällä. Mittaukset tulee suorittaa laitekohtaisesti aina samasta mittapisteestä. Tämä mahdollistaa luotettavan trendiseurannan. Mittauspiste merkitään niin, että siitä selviää myös mittaussuunta. Mittauspiste voidaan merkitä esimerkiksi maalilla, nipalla tai muulla selkeällä ja yksiselitteisellä tavalla. Mittauspisteiden merkinnälle on oltava käytössä looginen numerointi- tai kirjainkoodijärjestelmä. Standardissa PSK 5702 määritetään mittauspisteen merkinnälle käytettäväksi merkkiketjua aa..aa bb c dd. (Lumme et al. 2013, 24; PSK 5702.)

Merkkien selitykset ovat:

- | | |
|----------|-------------------------------|
| - aa..aa | Laitepaikan tunnus |
| - bb | Mittauspaikan juokseva numero |
| - c | Mittaussuunta |
| - dd | Lisämerkinnät tarvittaessa |

Mittaussuunnan merkinnällä tarkoitetaan standardissa PSK 5702 kuvan 39 mukaisia kirjaintunnuksia. Näiden merkintöjen lisäksi voidaan käyttää merkin-
tää S, joka tarkoittaa säteissuunnan mittausta (Lumme et al. 2013, 24; PSK 5702).

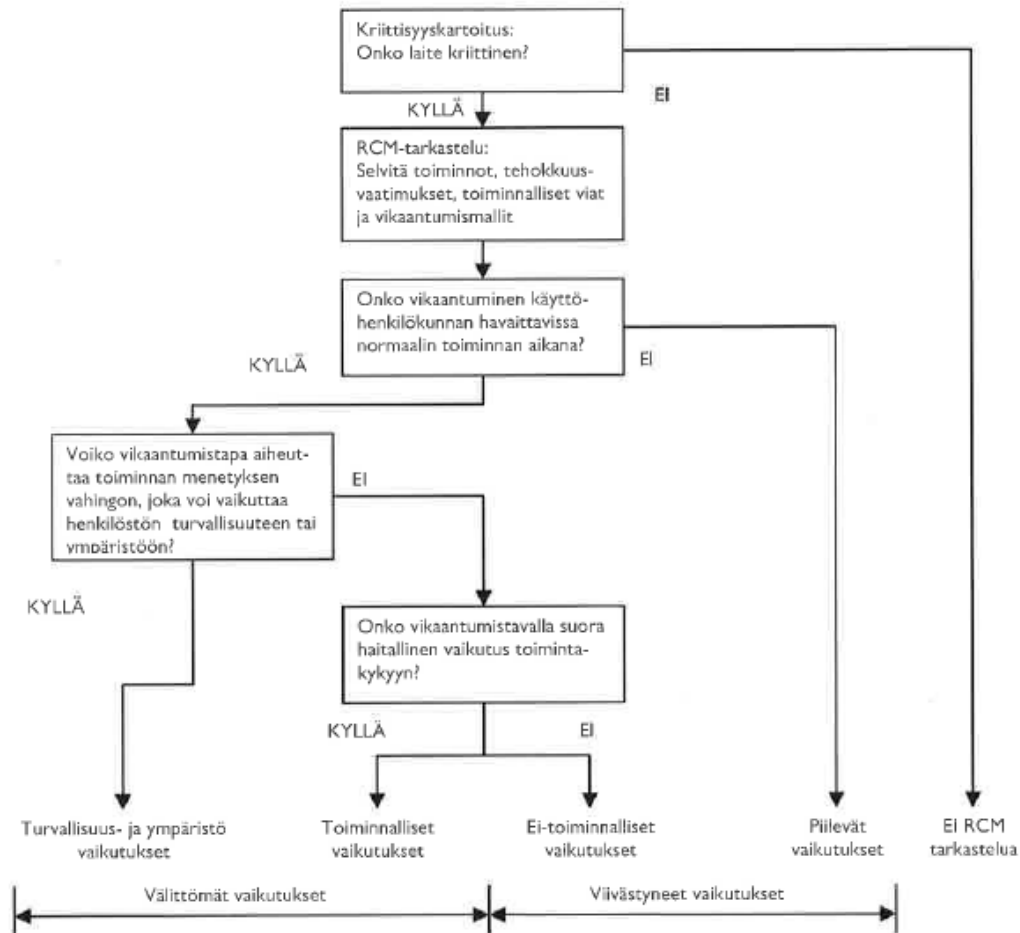


Kuva 39. Mittaussuuntien merkitseminen. (Lumme et al. 2013, 24; PSK 5702)

Nykyään on muodostunut yleiseksi tavaksi merkitä mittauspisteet radiotaajui-
seen etätunnistukseen perustuvalla menetelmällä. Alan kirjallisuudessa tämä
tunnetaan käsitteenä RFID, joka on lyhenne englanninkielisistä sanoista (Ra-
dio Frequency Identification). VL Turvan kannettavassa mittauslaitteessa on
sisään integroitu RFID -lukija. Lukijalla voidaan tunnistaa mittauspiste tarra-
kiinnityksellä asennetusta RFID -merkistä. RFID -merkkejä kutsutaan myös
tageiksi. (Schaeffler Technologies AG & Co. KG. 2013, 118 - 119.)

3.4.2 Mitattavien laitteiden määrittäminen ja mittausvälit

Suunnitteluvaihe on merkittävässä roolissa kunnossapidon onnistumisen kan-
nalta. Kuntoon perustuvan kunnossapidon suunnittelua pidetään vaikeimpana
kunnossapidon osa-alueena (Mikkonen et al. 2009, 146; Järviö et al. 2007).
Kunnossapidon strategiaa suunniteltaessa voidaan käyttää hyväksi valmiiksi
luotuja kunnossapitomalleja. Mikkonen (et al. 2009, 146 - 147) käyttävät esi-
merkkinä teoksessaan ennakoivan kunnossapidon suunnitelmaa, jossa käyte-
tään sekä RCM -prosessia ja kriittisyyskartoitusta. Valmiin kunnossapitomallin
soveltaminen ei aina ole mahdollista tai edes kannattava tapa suunnitella
kunnossapitoa, kuten jo kappaleessa 2.2 mainittiin. Kriittisyyskartoituksen voi-
daan sanoa olevan yleinen tapa määrittää huoltokohteita. Yksin RCM:n mu-
kaisen kokonaisvaltaisen kunnossapidon toteuttaminen muodostuu usein liian
työlääksi ja taloudellisesti rasittavaksi kunnossapitomalliksi. (Mikkonen et al.
2009, 146 - 147.) Kuvassa 40 on esitetty kunnossapidon suunnittelun proses-
si, jossa käytetään yhdistettyä RCM -mallia ja kriittisyysanalyysia.



Kuva 40. RCM:n ja kriittisyysanalyysin yhdistetty suunnitteluprosessi (Mikkonen et al. 2009, 147)

Suomalainen standardi PSK 6800 käsittelee kriittisyyskartoitusta. Kriittisyyskartoituksen on tarkoitus toimia kunnossapitosuunnitelman lähtötiedon tuottajana. Yksittäisen laitteen tai laitteiston kriittisyyttä arvioitaessa merkitseviä tekijöitä ovat turvallisuus- ja ympäristötekijät, tuotantovaikutukset sekä korjaus- ja seurauskustannukset. Standardin mukaan laitteita voidaan arvioida erillisen kriittisyysindeksin mukaisesti. Kriittisyysindeksin määrittämiseksi on luotu myös matemaattinen laskentakaava, jossa käytetään lopullisen indeksin muodostumiseen eriasteisia painoarvoja ja kertoimia. Kriittisyysindeksi on esitetty kaavassa 13. Laitetason kriittisyyden laskennan painoarvot ja kertoimet on esitetty liitteen 2 taulukossa. (Mikkonen et al. 2009, 148 - 149; PSK 6800.)

$$K = p(W_s M_s + W_e M_e + W_p M_p + W_q M_q + W_r M_r) \quad (13)$$

Kriittisyysindeksin laskentakaavassa esiintyvien merkintöjen selitykset PSK 6800 mukaan (Mikkonen et al. 2009, 148; PSK 6800):

- p Vikaväli
- W_s on turvallisuusriskin painoarvo ja M_s on turvallisuusriskin kerroin
- W_e on ympäristöriskien painoarvo ja M_e on ympäristöriskien kerroin
- W_p on tuotannon menetyksen painoarvo ja M_p on tuotannonmenetyksen kerroin
- W_q on laatukustannusten painoarvo ja M_q on laatukustannusten kerroin
- W_r on korjauskustannusten painoarvo ja M_r on korjauskustannusten kerroin

Standardi PSK 5705 käsittelee värähtelymittauksien mittaustoiminnan suunnittelua. Tämä standardi määrittää valvottavien kohteiden valintaan vaikuttavat tekijät yhdenmukaisesti standardin PSK 6800 kanssa. Standardissa PSK 5705 määritetään tarkemmin laitteiden valinnasta värähtelymittauksien kannalta arvioituna. Kuntokartoituksella voidaan arvioida laitteiden toimintakuntoa ja arvioida niiden huolto- ja uusintatarve jatkossa. Kuntokartoitus määrittää kunnonvalvonnan suunnittelulle ns. lähtötason. Värähtelymittauksien käyttö kunnonvalvonnassa perustuu trendin seuraamiseen. (Lumme et al. 2013, 50 - 51; PSK 5705.)

Värähtelymittauksien avulla laitteille määritetään valvottavat värähtelyn raja-arvot. Ensimmäinen raja-arvo, jota voidaan kutsua myös hälytysrajaksi, on varoitusraja. Varoitusrajan saavuttaminen antaa indikaation kunnonvalvonnan tehostamisen tarpeesta. Toiseksi hälytysrajaksi määritetään ylempi arvo, joka toimii indikaationa vauriorajan saavuttamisesta. Näiden kahden hälytysrajan alapuolelle voidaan tarvittaessa määrittää erillinen huomioraja, jonka tarkoitus on indikoida normaalista poikkeava tilanne. Raja-arvot määritetään käyttämällä valmistajan suosituksia, konetyypin värähtelystandardeja tai kunnonvalvonnan kokemusten myötä muodostuneita tuloksia. Raja-arvojen määrittämiseen voidaan myös käyttää standardin PSK 5704 määäämiä värähtelyrajoja koneluokittain. PSK 5704:n värähtelyraajat ovat suurimmaksi osaksi yhdenpitäviä jo aiemmin kappaleessa 3.2.1 esitettyjen standardin ISO 10816 värähtelyraajojen kanssa. (Lumme et al. 2013, 43, 51 - 52; PSK 5704; PSK 5705.)

Raja-arvoja voidaan täsmentää, kun on tehty vähintään kymmenen edustavaa mittausta. Standardi PSK 5705 ohjeistaa määrittämään raja-arvot seuraavalla tavalla (Lumme et al. 2013, 52):

- Varoitusraja = $1,6 \cdot \text{keskiarvo} + 2 \cdot \text{keskihajonta}$
- Vaurioraja = $4 \cdot \text{keskiarvo} + 2 \cdot \text{keskihajonta}$
- Huomautusraja = $\text{keskiarvo} + 3 \cdot \text{keskihajonta}$

Värähtelymittauksen piiriin valittujen laitteiden valvonnan tulee olla säännön-mukaista ja järjestelmällistä. Tyypillisesti laitteet määritetään mitattavaksi reit-timittauksina. Saatuja tuloksia verrataan aiempiin mittauksiin ja hälytysrajoihin. Mittausreitissä laitteet ja mittauspisteet järjestellään järkevään ja samoin mää-rävälein suoritettaviin mittauksiin. Mittausreitin suunnittelussa on keskityttävä siihen, että mittausreitti on mitoitettu oikein. Mittausreitin tulee olla pituudel-taan sellainen, että siitä saatavat tulokset ja vianmääritykset ovat toteutetta-vissa saman päivän aikana. (Mikkonen et al. 2009, 169.)

Mittausvälit määritellään ottaen huomioon laitetta koskevat käyttöominaisuu-det ja -tarkoitus. Muita määrittelyyn vaikuttavia tekijöitä ovat käytettävä valvon-tamenetelmä, mittauskohteen kriittisyys, häiriöherkkyys, laitteen vikojen keh-itymisnopeus ja käytettävissä olevat kunnossapidon historiatiedot. Mittausvä-lien määrittämiseen voidaan käyttää apuna liitteen 3 mukaista, standardissa PSK 5705 esitettyä kokemuseräisyyteen perustuvaa taulukkoa. (Lumme et al. 2013, 55 - 56; PSK 5705.)

3.4.3 Mittaustoiminnan järjestely

Laadukkaan mittaustoiminnan aikaansaamiseksi on huomioitava monia asioi-ta. On tarkasteltava henkilöstön valmiutta mittaustoiminnan toteuttamiseksi. Lisäksi on arvioitava jo käytössä olevia kunnonvalvontatietoja ja toiminnan tu-kemiseksi tarvittavien lisätietojen saatavuutta. Arvioitavia asioita ovat myös henkilöstön koulutustarve ja tehtävänkuvat mittaustoiminnassa. Mittaustoimin-nalle on määritettävä selkeästi ylläpitovastuulliset henkilöt, jotka pitävät huolen tietojen tallentamisesta raportoinnista ja toimenpiteistä. Mittaustuloksien seu-

rannan perusteella laitteiden kuntoa voidaan arvioida ja määrittää ennusteita niiden käytettävyydestä. (Lumme et al. 2013, 57; PSK 5705.)

4 KUNNOSSAPITO JA LAAKERIEN VÄRÄHTELYMITTAUKSET VL TURVALLA

4.1 Yleistä

Vartiolaiva Turva on suorituskyykyinen alus Rajavartiolaitoksen lakisääteisten tehtävien täyttämiseen. Hyvä suorituskyyky pystytään ylläpitämään aluksen elinkaaren ajan oikea-aikaisella ja laadukkaalla kunnossapidolla. Hyvin toteutetulla kunnossapidolla parannetaan myös aluksen taloudellista käyttöä. Tehokkaalla kunnonvalvonnalla alkaviin vikoihin kyetään vaikuttamaan riittävän ajoissa, jolloin seisonpäivien määrä ja vakavien vikaantumisten aiheuttamat taloudelliset vaikutukset vähenevät.

Laakerien värähtelymittauksia on hyödynnetty jo vuosia eri teollisuuden aloilla, mutta merenkulun alalla se ei ole yleistynyt yhtä laajasti. Värähtelymittausten tekeminen laivaolosuhteissa luo mittaustoiminnalle omat haasteensa. Verrattaessa laivan olosuhteita teollisuuslaitoksessa vallitseviin suhteellisen stabiileihin käyttöolosuhteisiin on selvää, että mittaustuloksien luotettavuutta on tarkasteltava kriittisemmin. Laivan käyttöympäristössä muuttuvia olosuhdetekijöitä ovat mm. keliolosuhteet ja alukselle muodostuvat vaihtelevat liiketekijät. Myös aluksen nopeus mittaushetkellä voi muodostaa mittaukseen vaikuttavaa runkoresonaatiota, Resonaatio voi osaltaan myös vahvistua aluksen liiketekijöiden vaikutuksesta. Laivoissa lisääntynyt valvonta-automaatio mahdollistaa useiden eri mittauserien yhdenaikaisen tarkastelun. Useiden parametrien tarkastelu monipuolistaa yksittäisen laitteen lopullista kunnon arviointia. Nykyaikaisissa koneautomaatiojärjestelmissä on käytettävissä erilaisia trendityökaluja, joita voidaan hyödyntää tallennetun datan tarkastelussa. VL Turvan koneautomaatiojärjestelmä tukee ominaisuuksiltaan monipuolista parametrien seurantaa.

Tässä opinnäytetyössä esiintyvien mitattavien laitteiden valintaa ja kriittisyystekijöitä arvioitaessa on konsultoitu VL Turvan konepäälliköitä. Aluksen konepäälliköinä toimivat insinööriluutnantit Veli Saarinen ja Riku Ojala. He ovat

olleet VL Turva-projektissa aluksen suunnitteluvaiheesta alkaen. He toimivat myös aluksen rakennusvalvojina valmistustelakalla.

4.2 Kunnossapitostrategia

VL Turvan kunnossapitostrategian voidaan arvioida muokkautuneen osittain jo ensimmäisen toimintavuotensa aikana käyttökelpoiseen muotoon. Rajavartiolaitoksen esikunnan teknisen osaston ohjeet ja määräykset antavat viitekehyydet aluksella suoritettavalle kunnossapidolle. Määräykset ja ohjeet muodostuvat GL -luokituslaitoksen vaatimuksia noudattaen. Osittain kunnossapitostrategia perustuu myös muilta Rajavartiolaitoksen aluksilta saatuihin kokemusperäisiin arvioihin. Käytössä olevan kunnossapitostrategian voidaan sanoa olevan sekoitus TPM- ja RCM -toimintamallia sekä kriittisyysanalyysiin perustuvaa tarkastelua. Värähtelymittauksien näkökulmasta laitteita on jaettu kriittisiin ja vähemmän kriittisiin ryhmiin. Joidenkin vähemmän tärkeiden laitteiden kohdalla on jatkossa järkevin tapa noudattaa RTF:n mukaista käyttötapaa.

Yhteistyötä korostavan TPM -toimintamallin voidaan arvioida olevan käytössä ainakin osittain. Aluksen tekninen henkilöstö on motivoitunutta ja alakohtaisesti varsin hyvin koulutettua. VL Turvan konemestarit ovat lähes poikkeuksetta meri-insinöörin koulutuksen omaavia, joilla on usean vuoden työkokemus. Tämän lisäksi aluksella konemiehinä toimivat henkilöt ovat kaikki vahtikonemestarin koulutuksen saaneita. Henkilöstö on hakeutunut alukselle töihin omasta anomuksestaan. Hakiessaan he ovat tiedostaneet monitoimialuksen teknisen haasteellisuuden. Huollot, korjaustyöt ja laitteistokohtaiset tarkastukset on toteutettu täsmällisesti aikataulutettuina. Aikataulullisesti toteutetun huollon varmistamiseksi aluksella on käytössä Elomaticin tuotannon hallinnan ja elinkaaren ohjauksen työkaluksi tarkoitettu Elowise Infokeeper-ohjelmisto (Elomatic. 2014). Laitteistoille tehtävät huoltotyöt on syötetty Infokeeper -ohjelmaan työohjeineen ja ne kuitataan suoritetuiksi tietokantaan. Samalla ohjelmalla ylläpidetään varaosien varastokirjanpitoa, joka mahdollistaa reaaliaikaisen varaosakannan tarkastelun ja ylläpidon. Aluksen konehuoneita ja laitteita ylläpidetään huolto- ja siivoustoimin. Näin varmistetaan mahdollisimman

hyvä toimintaympäristö käytössä oleville koneille ja laitteille. Laitteiden ja koneistojen osalta on lisäksi järjestetty laitteistovalmistajan koulutuksia henkilöstön osaamisen parantamiseksi. Samoin erilaisia mittauslaitteita hankittaessa on koulutuksista niin ikään huolehdittu.

Luotettavuuskeskeisen kunnossapidon (RCM) voidaan arvioida olevan toimintamallina sopivin erityisesti aluksen kuljettamisen kannalta kriittisiin kohteisiin. Mallin voidaan sanoa olevan jo käytössä suurilta osin. RCM -mallin mukainen toiminta korostuu aluksen laitteiston ollessa vielä takuun alainen. Kaikki huollot ja tarkastukset on toteutettu takuuaikana laitteistovalmistajan ohjeistuksen mukaan. RCM:n mukaisiksi kriittisiksi kohteiksi voidaan nimetä mm. propulsiolaitteet, moottorit, generaattorit ja suoraan näiden toimintaan vaikuttavat apulaitteet. Kriittisten laitteiden huoltoa ja kunnonvalvontaa tehdään osana aluksen henkilöstön päivittäistoimenpiteitä. Lisäksi joidenkin laitteistokokonaisuuksien kohdalla on solmittu valmistajien kanssa huoltosopimuksia. VL Turvalla on käytössä miehittämätöntä konehuonetta koskevan luokituksen vuoksi runsaasti kahdennettuja laitteita. Kahdennus ei kuitenkaan muuta laitteiden lopullista kriittisyysarviota. Useat jatkuvatoimiset laitteet toimivat vuorokäyttöperiaatteella, jolloin myös niiden käyttötunnit ovat toisiaan mukailevia. Elinikäperusteisen kulumisen ja vikaantumisen voidaan tällöin olettaa myös tapahtuvan lyhyellä aikavälillä toisiinsa verrattuina.

Kuten jo aiemmin luvuissa 2.2.1 ja 3.4.2 tuli ilmi, on RCM -toimintamalli varsin raskas ja kallis yksistään käytettäväksi. Tästä syystä useita ei kriittisiä laitteita on järkevintä määrittää jatkossa kunnossapidettäväksi SRCM- ja RTF -toimintamallin mukaisesti. SRCM -mallia voidaan käyttää vähemmän kriittisten laitteiden kunnossapitoon. Tämä toimintamalli edellyttää kuitenkin, että vikaantumismallit tunnetaan riittävän tarkasti. RTF:n mukaista käyttötapaa on mahdollista toteuttaa laitteille, joiden voidaan kriittisyysarvioinnin perusteella määrittää olevan vähäpätöisiä ja uusintakustannuksilta alhaisia. Tähän luokkaan kuuluvia laitteita ovat esimerkiksi, ei kriittisten tilojen ilmanvaihdon pienjännitemoottorit. Pienjännitemoottoreiden valvonta voidaan määrittää toteutettavaksi ainoastaan kunnonseurantana, jolla kyetään ennakoimaan vaihtomoottorin hankinnan ajankohta.

4.3 Kriittisyysarviointi

VL Turvan kriittisyysanalyysissa propulsioon vaikuttavien laitteiden voidaan todeta lukeutuvan kaikkein kriittisimmiksi kohteiksi. Valintaperustetta tukevat myös liitteen 2 kriittisyystekijät. Näihin laitteisiin kohdistuu koneiston osalta suoraan tai välillisesti kaikki kriittisyystekijät. Tekijöitä ovat turvallisuusriskit, ympäristöriskit, tuotannon menetykset (turvallisuuspalvelut), laatu- ja kustannukset (käytettävyys) sekä korjaus- ja seurauskustannukset (Mikkonen et al. 2009, 149; PSK 6800). Lisäksi kriittisiksi laitteiksi voidaan arvioida suoraan aluksen kuljetuslaitteiston toimintaan vaikuttavat apulaitteet. Tällaisia laitteita ovat mm. laitteiden jäähdytysvesipumput ja moottoreiden diesel -polttoaineen kiertopumput. LNG -järjestelmän osalta höyrystimen lämmitysvesipumppujen ja typpikompressorien voidaan niin ikään arvioida kuuluvan tähän kategoriaan. Sähköisten propulsiolaitteiden kohdalla kriittisiksi kohteiksi voidaan lukea myös noususäädön ja ohjauksen hydraulikkakoneikot, koska aluksen ohjailu perustuu sähköpropulsiolaitteiden toimintaan. Wärtsilä 12V 34DF -moottorin pyörittämä akselikäyttöinen propulsiolaitte voidaan nimetä myös kriittiseksi laitteeksi. Sen toimintahäiriö ei avovesikaudella vaikuta suoraan heikentävästi aluksen ohjailtavuuteen tai kuljettamiseen. Vaikuttavuus muuttuu kuitenkin jäissä ajettaessa, jolloin potkurin lepuutus ei ole mahdollista, vaan akselin on pyörittävä samanaikaisesti sähköpropulsiolaitteiden kanssa. Aluksen paloturvallisuuden takaamiseksi myös palo- ja sprinkleripumppujen voidaan arvioida lukeutuvan kriittisiin laitteisiin.

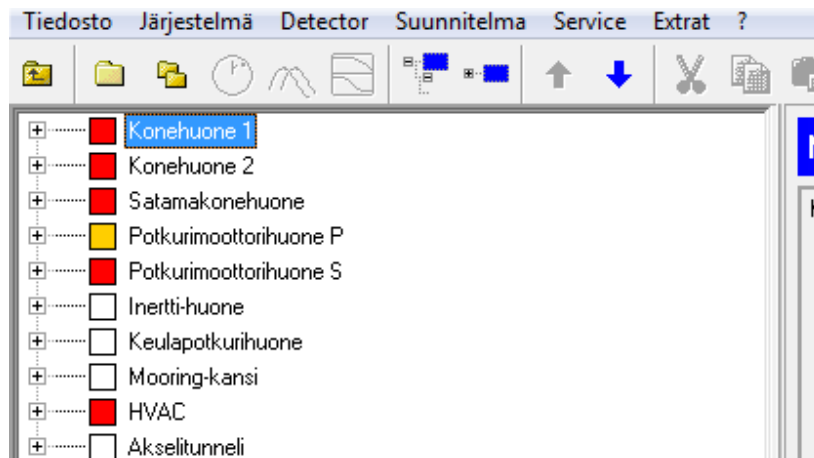
Kriittisten laitteiden kohdalla on suositeltavaa toteuttaa koko elinkaaren ajan RCM:n mukaista kunnossapito-ohjelmaa. Vaikka useat apulaitteista ovat kahdennettuja, seuraamalla värähtelytrendiä säännöllisesti voidaan arvioida luotettavasti myös niiden käyttökunnossa tapahtuvia muutoksia. Värähtelyn mitaustuloksien seuranta parantaa laitteiden luotettavuutta ja mahdollistaa suunnitelmallisen huoltotoiminnan. Värähtelytrendin mukaan voidaan myös aikatauluttaa varaosahankinnat ennakoivasti.

SRCM:n mukaisesti toteutettavaan kunnossapitoon on mahdollista liittää vähemmän kriittisiä laitteita. Tähän ryhmään kuuluvat esimerkiksi käynnistysilmakompressorit, joista on jo olemassa käyttökokemuksia. Aluksella on kahdennetut kompressorit ja RP -luokituksen mukaisesti konehuoneiden välillä on

ristiin käytön mahdollisuus. SRCM:n käyttöä voidaan myös suositella käytettäväksi painolastipumppujen, polttoaineen siirtopumppujen ja separaattoreiden kohdalla.

4.4 Mittausreitti ja -pisteet

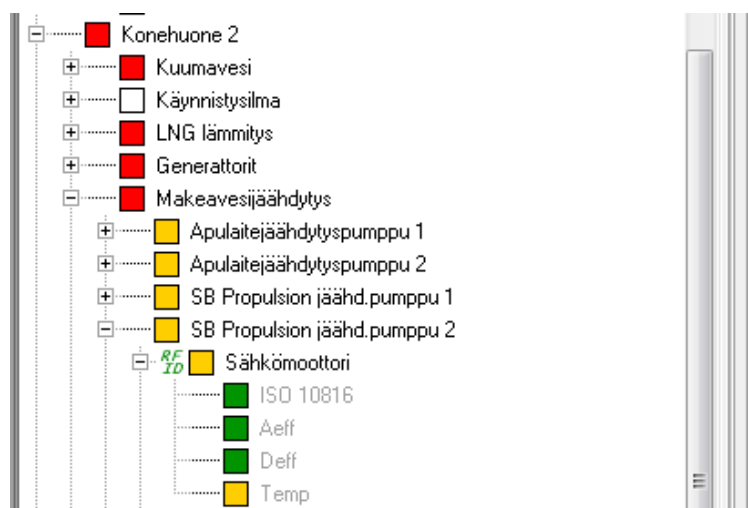
VL Turvalla tehtävien värähtelymittauksien mittausreitti on luotu FAG Trendline -sovellukseen tilakohtaisesti. Tilat on jaettu sovelluksen puurakenteessa yhdeksään eri kokonaisuuteen. Ainoana poikkeuksena selkeästä tilajaottelusta eroaa HVAC:n mittauspisteet, jotka jakautuvat laitteiston ominaisuuksien vuoksi eri puolille alusta. Kyseessä on niin yksilöllinen laitteistokokonaisuus, että se on mittaustoiminnan kannalta helpommin hallittavissa omana kokonaisuutena. Tilajaottelun käyttö perustuu siihen, että mittaukset voidaan keskittää paremmin samalle alueelle. Myös kerrallaan tehtävien mittauksien määrä pysyy rajallisena. Kun mittauksien määrä on tarpeeksi pieni, mahdollistaa se myös saman päivän aikana suoritettavan mittaustuloksien analysoinnin. Saman päivän aikana suoritettujen mittaustulosten tarkastelun ja vianmäärittelyn merkitystä on korostettu luvussa 3.4.2. Kuvassa 41 on esitetty Trendline -sovelluksessa käytetty tilajaottelu.



Kuva 41. Trendline -sovelluksen tilakohtainen jaottelu. (Trendline -sovellus)

Tilaa osoittava kokonaisuus (osasto) on jaettu sovelluksen alikohde-toimintoa käyttäen. Ensimmäinen alikohde nimeää laitteistoryhmän, joka on edelleen jaettu ryhmän laitteet tarkemmin yksilöiviin tietoihin. Yksilöidylle laitteelle on puo-

lestaan määritetty kyseisestä laitteesta suoritettavat mittaukset. Kuvassa 42 esitetään puurakenteen muodostuminen alikohdetietoineen. Kuvan esimerkissä tarkastellaan konehuone 2:n SB -puolen propulsiolaitteen jäähdytysvesipumppua ja sitä pyörittävää sähkömoottoria. Pumpulle ja sähkömoottorille suoritettavat mittaukset on yksilöity viimeisiksi puurakenteen alikohteiksi, eli niin sanotuiksi mittausvalinnoiksi.



Kuva 42. Puurakenteen muodostuminen. (Trendline -sovellus)

Erilaisia mittausvalintoja on käytetty laitteen valvontatarpeen mukaisesti arvioituina. Joissakin mittauspisteissä valvotaan pelkkää kokonaisvärähtelyn tasoa (RMS). Tarkemmin valvottavissa mittauspisteissä on mittausvalinnat määritetty monipuolisemmin. Esimerkiksi kuvan 42 jäähdytysvesipumpun sähkömoottorista on määritetty mitattaviksi arvot ISO 10816, Aeff, Deff ja lämpötila. Laakerin lämpötila mitataan kannettavaan mittalaitteeseen kytkettävällä infrapuna-lämpömittarilla. Kuvassa 43 on esitetty sovelluksen puurakenteessa esiintyvien mittausvalintojen merkitykset. (Schaeffler Group. 2011, 270.)

Characteristic value	Analog channel	Frequency range
a_{eff}	Acceleration	2 kHz - low pass acceleration channel
a_{sel}	Acceleration	f_{min_a} - low pass a (both frequencies adjustable, see table below)
ISO 10816	Speed	10 Hz - 1 kHz
v_{sel}	Speed	f_{min_v} - low pass velocity channel (both frequencies adjustable, see table below)
d_{eff}	Demodulation	f_{min} - low pass demodulation channel
d_{sel}	Demodulation	f_{min} - low pass demodulation channel (both frequencies adjustable, see table below)

Kuva 43. Mittausvalintojen merkitykset. (Schaeffler Group. 2011, 270)

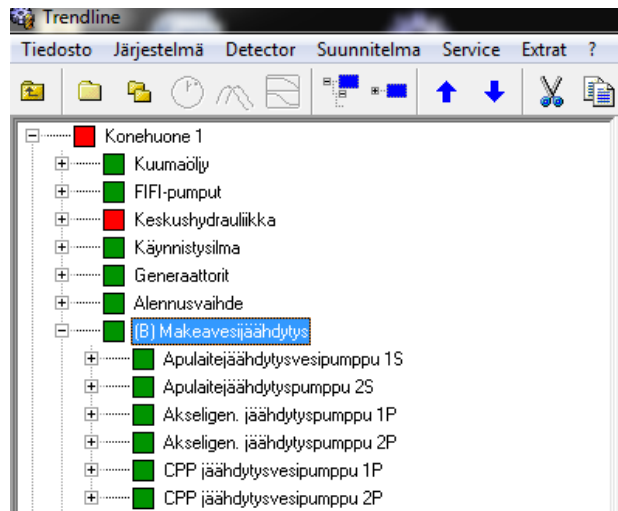
VL Turvalla on määritetty Trendline -sovellukseen yhteensä 103 pyörivää laitetta, joiden kunnonvalvontaan voidaan käyttää värähtelymittausta. Mittauspisteitä on yhteensä 204. Näistä mittauspisteistä 83:n voidaan määrittää lukeutuvan luvun 4.3 mukaisen jaottelun kriittisiksi mittauspisteiksi. Konehuoneiden 1 ja 2 mittauksissa on harkittava mittauspisteiden jakamista pienempiin osaluokkiin. Tällöin voidaan varmistua mittaustoimintaan käytettävän ajan riittävyydestä myös mittauksien analysointiin. Mittauspisteet on jaoteltu tilakohdittain taulukossa 2 (sivu 67). Taulukosta voidaan tarkastella mittauspisteiden kokonaisjakaumaa aluksen eri tiloihin.

Taulukko 2. Värähtelymittauksien laitteet ja mittauspisteet

Tila	Mitattavat laitteet	Mittauspisteet	Kriittiset mitauspisteet
Konehuone 1	17	56	28
Konehuone 2	15	53	19
Satamakonehuone	8	15	14
Potkurimoottorihuone P-puoli	6	10	9
Potkurimoottorihuone S-puoli	6	10	9
Inert-huone	4	6	6
Keulapotkurihuone	4	6	4
Mooring-kansi	2	4	-
HVAC	43	49	-
Akselitunneli	4	5	3

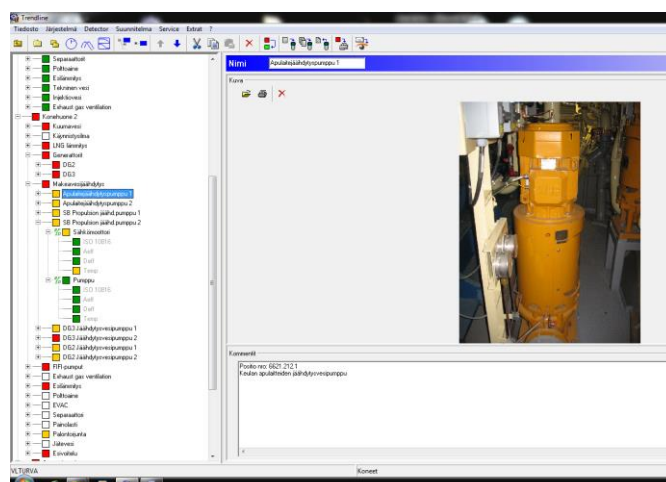
Kehitettäessä mittaustoimintaa edelleen on mahdollista tarkentaa ja keskittää mittauspisteiden valvontaa Infokeeper -ohjelmaa hyödyntäen. Infokeeper mahdollistaa mittauspisteiden syötön työmäärityksinä kappaleessa 2.3 esitetyn kriittisyysanalyysin jaottelun mukaisesti. Jaottelussa pääpaino kohdistetaan kriittisiin A- ja B-luokan laiteryhmiin. C-luokan laitteet voidaan määrittää valvottavaksi harvemmin ja valvonnan pääpaino kohdistetaan laitteen käyttötilan selvitykseen ISO 10816 -standardin mukaisella kokonaistasovalvonnalla. Trendline -sovelluksen puurakenteessa kriittisyysanalyysiperusteinen kirjain-

merkintä voidaan syöttää suoraan mittauspisteen etumerkiksi. Kuvassa 44 on esitetty malli etumerkin käyttömahdollisuudesta konehuone 1:n jäähdytysvesilaitteistolle. Esimerkin laiteryhmä on luokiteltu kriittisyysanalyysin perusteella luokkaan B.



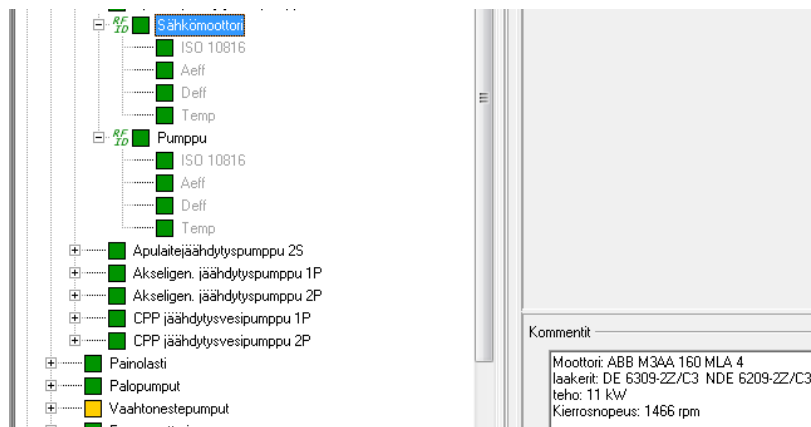
Kuva 44. Kriittisyysanalyysiin perustuvan etumerkin käyttö (Trendline -sovellus)

Trendline -sovelluksen monipuolisia ominaisuuksia on käytetty hyväksi mittauspisteiden tunnistamisen helpottamiseksi. Kun sovelluksessa klikataan hiirellä laitetietoa, avautuu lisätietoikkuna. Lisätietoikkunaan on tallennettu kuva mitattavasta laitteesta. Tämän lisäksi kommenttikenttään on syötetty laitteen positionumero ja mahdolliset tarkentavat sijaintitiedot. Kuvassa 45 on esitetty lisätietoikkunasta saatava informaatio.



Kuva 45. Lisätietoikkuna. (Trendline -sovellus)

Sovelluksen infoikkunaa on hyödynnetty syöttämällä siihen kunkin mittauspisteen yksilölliset tiedot. Tiedot on kerätty laitteiden tyyppikilvistä ja laitemanuaaleista. Infoikkunan kommenttikenttään on koottu kyseisen laitteen mallitieto, DE- ja NDE -laakerien tiedot, teho sekä kierrosnopeus. Näiden Trendline -sovelluksessa esiintyvien tietojen lisäksi jokainen mittauspiste on tunnistettavissa kannettavalla mittauslaitteella, RFID -lukijaa käyttäen. Mittauspisteen viereen on liimattu selkeästi näkyvälle paikalle RFID -tagi, joka voidaan lukea asettamalla kannettava mittauslaite sen päälle. Kannettava mittauslaite tunnistaa tagin ja avaa sen perusteella mitattavan pisteen Trendline -sovelluksessa määritetystä konfiguraatiosta. Kuvassa 46 on esitetty infoikkunan kommenttikenttään syötetyt yksilölliset tiedot.



Kuva 46. Mittauspisteen yksilölliset tiedot (Trendline -sovellus)

Magneetilla varustetun anturin kiinnityspiste on merkitty jokaiseen mittauspisteeseen tussilla. Kuten luvussa 3.4.1 mainitaan, on värähtelymittauksen luotettavuuden kannalta oleellista, että mittaus tehdään jokaisella mittauskerralla samasta anturin kiinnityspisteestä. Lisäksi mittauspisteen tulee olla luotettavasti tunnistettavissa. Huolellisesti tehdyillä ennakoivilla toimenpiteillä pystytään varmistamaan riittävän luotettava mittaustoiminta. Kuvassa 47 on esitetty VL Turvan konehuoneessa sijaitsevan jäähdytysvesipumpun mittauspiste. Kuvassa on esitetty mittauspisteen määrittämistä varten tarkoitettu RFID -tagi ja magneettikiinnitteisen anturin paikka.



Kuva 47. Jäähdytysvesipumpun mittauspiste.

4.5 Mittaustoiminta

Kuten jo aiemmin tämän opinnäytetyön luvussa 3.4.2 mainittiin, tehokkaan mittaustoiminnan kannalta on tärkeä määrittää mittausvälit oikein. Jatkuvatoimisten laitteiden värähtelymittauksien mittausväleistä on esitetty suositus liitteessä 3 (Lumme et al. 2013, 56; PSK 5705). VL Turvalla käytettävistä laitteista valtaosa on jatkuvatoimisia laitteita, joiden mittausväleiksi on myös luontevaa käyttää standardin PSK 5705 mukaisia suosituksia. Kriittisten laitteiden jaksottaisen kunnonvalvonnan mittausvälit määräytyvät liitteen 3 taulukossa kahdesta viikosta kahteen kuukauteen. Myös VL Turvan kohdalla on perusteltua luoda Infokeeper -ohjelmaan mittaustyöt tehtäviksi tämän suosituksen mukaisesti. Kriittisyysanalyysin mukaisesti määritettyjen A-luokan laitteille mittausvälinä tulisi käyttää kahta viikkoa. B-luokan laitteille voidaan käyttää neljän viikon välein tehtäviä mittauksia. Saman suosituksen mukaan ei kriittisten laitteiden mittausväleiksi riitä 2 - 4 kuukautta. Laitteille, joille on määritetty riittävän ainoastaan käyttötilaa osoittavat kokonaistasomittaukset, voidaan mittausväleiksi VL Turvalla suosituksen mukaisesti käyttää kolmea kuukautta. HVAC -järjestelmä pitää sisällään useita tällaisia kohteita. On suositeltavaa, että mittauksien aikatauluttaminen saatetaan loppuun mahdollisimman nopealla aikataululla ja työt tullaan syöttämään Infokeeper -ohjelmaan.

Mittauksien luotettavuuden ja trendiseurannan kannalta on ensiarvoisen tärkeää tehdä mittaukset aina samalla koneiston ajoprofiililla. Näin pystytään minimoimaan ympäröivien värähtelylähteiden vaikutus mittaustrendiin. Trendline

-sovellus mahdollistaa koneiston käyttöprofiilia osoittavien kommenttien li-säämisen mittauksen tulostietosivun yhteyteen. Kommenttikentästä on mahdollista tarkastaa myöhemmässä vaiheessa mittauksen aikana käytössä ollut ajoprofiili. Ajoprofiilin vaikutusta mittaustulokseen tukevat kuvassa 48 esitetyt jäähdytysvesipumpun sähkömoottorille suoritettut koemittaukset. Koemittauksissa sähkömoottorin värähtelyä mitattiin yhteensä neljä kertaa. Kahdessa mittauksessa konehuoneessa sijaitsevan sähkömoottorin värähtelyä mitattiin ainoastaan satamakoneen käydessä. Satamakone sijaitsee viereisessä konehuoneessa. Kaksi mittausta puolestaan tehtiin peräkkäisinä mittauksina tilanteessa, jossa samassa konehuoneessa oli käynnissä kaksi Wärtsilä 6L 34DF -moottoria kaasukäytöllä. Kuvasta 48 on havaittavissa erilaisen ajoprofiilin aiheuttama poikkeama sähkömoottorin mittauksen RMS -arvossa. Koemittauksissa kokonaistasovalvonnan RMS -arvon voidaan havaita ylittäneen myös kuvassa 15 (luku 3.2.1) esitetyn ISO 10816-standardin mukaisen esihälytysrajan.

Esitetyt mittaukset											
<input checked="" type="checkbox"/> ISO 10816 <input checked="" type="checkbox"/> Aeff <input checked="" type="checkbox"/> Delt <input type="checkbox"/> Temp											
Krafiikka Mitatut arvot											
Päivä	Keräty nopeus/ RPM	ISO 10816/ mm/s	Päähälytys/ mm/s	Esihälytys/ %	Aeff/ mg	Päähälytys/ mg	Esihälytys/ %	Delt/ mg	Päähälytys/ mg	Esihälytys/ %	Kommentti
20.5.2015 14:41:10	1466,00	2,16	4,50	50,00	19,47	500,00	50,00	13,53	500,00	50,00	
11.1.2015 15:25:25	1466,00	2,06	4,50	50,00	15,92	500,00	50,00	12,48	500,00	50,00	
2.12.2014 18:44:17	1466,00	2,71	4,50	50,00	18,75	500,00	50,00	18,79	500,00	50,00	DG2 ja DG3 käynnissä
2.12.2014 18:39:23	1466,00	2,44	4,50	40,00	20,31	500,00	50,00	15,10	500,00	50,00	DG2 ja DG3 käynnissä

Kuva 48. Käytettävän ajoprofiilin vaikutus värähtelymittaukseen. (Trendline-sovellus)

Opinnäytetyön kirjoittamisajankohtaan mennessä tehdyt värähtelymittaukset on voitu toteuttaa ainoastaan avovesiolosuhteissa. Jää nähtäväksi, kuinka paljon jäissä ajaminen tulee muuttamaan saatuja mittaustuloksia. On hyvin oletettavaa, että jäissä ajaminen vaikuttaa mittaustuloksiin. Tätä eroavaisuutta on mahdollista tarkastella aikaisintaan tulevana talvena. Se voi omalta osaltaan vaikuttaa myös mittausvälien aikataulun lopulliseen määrittämiseen.

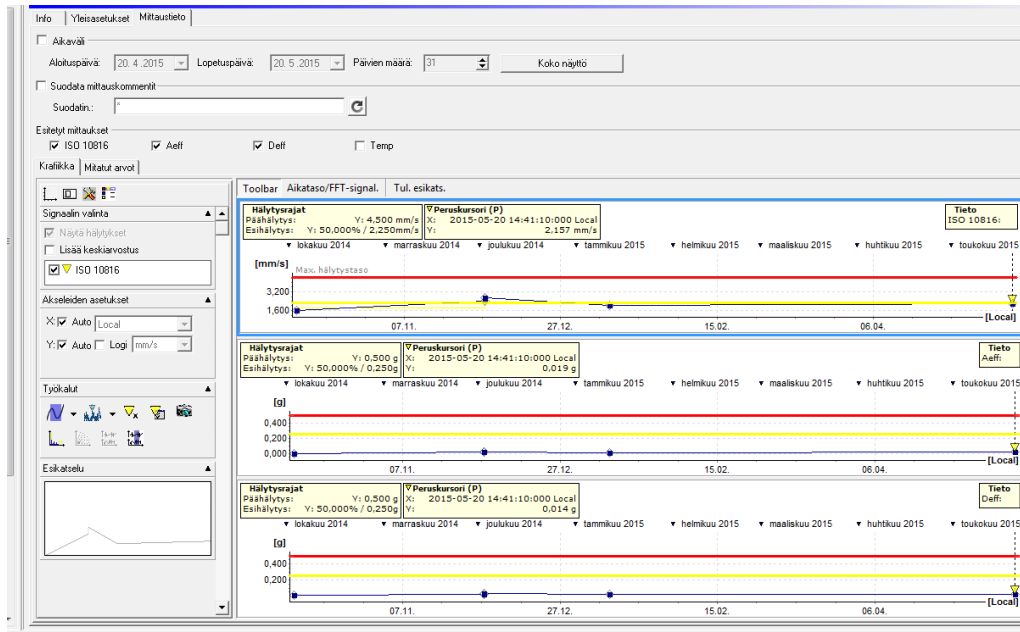
Itse mittauksien tekeminen kannettavalla laitteistolla on varsin selkeä toimenpide, johon VL Turvan tekninen henkilöstö on mahdollista perehdyttää omana työpaikkakoulutuksena. Tuloksien analysointi puolestaan on tarkoituksenmukaisinta määrätä muutamalle vastuuhenkilölle miehistökohtaisesti jaettuna.

Mittaustoimintaa tulee tehdä vielä noin vuoden ajan, jotta hälytys- ja vauriorajojen muokkaaminen on mahdollista. Opinnäytetyön sivuilla 59 - 60 (luku 3.4.2) on käsitelty tarkemmin hälytys- ja vauriorajojen määrittämistä. Tämän luvun mukaisesti on mitattava kymmenen laitekohtaisesti edustavaa mittausta, ennen kuin rajat määritetään. VL Turvalla ei ole vielä tehty riittävän montaa laitekohtaista mittausta. On myös huomioitavaa, että vika-analyysia ei ole tarkoituksenmukaista muutoinkaan määrittää yksittäiseen mittaukseen perustuen. Tärkeintä VL Turvalla tehtävissä värähtelymittauksissa on mittaustrendin ja sen muutoksien seuranta. Myös mahdolliset mittauksen häiriötekijät tulee sulkea pois uusintamittauksin. Tätä aihetta on tarkasteltu tarkemmin vianmääritystä käsittelevässä luvussa 3.3.2.

Mittaustulosten analysoinnin apuvälineenä voidaan käyttää opinnäytetyön lukuja 3. Lisäksi VL Turvalla on käytettävissä seuraavat opinnäytetyön lähteissä mainitut teokset, joissa analysointia on käsitelty hyvin laajasti:

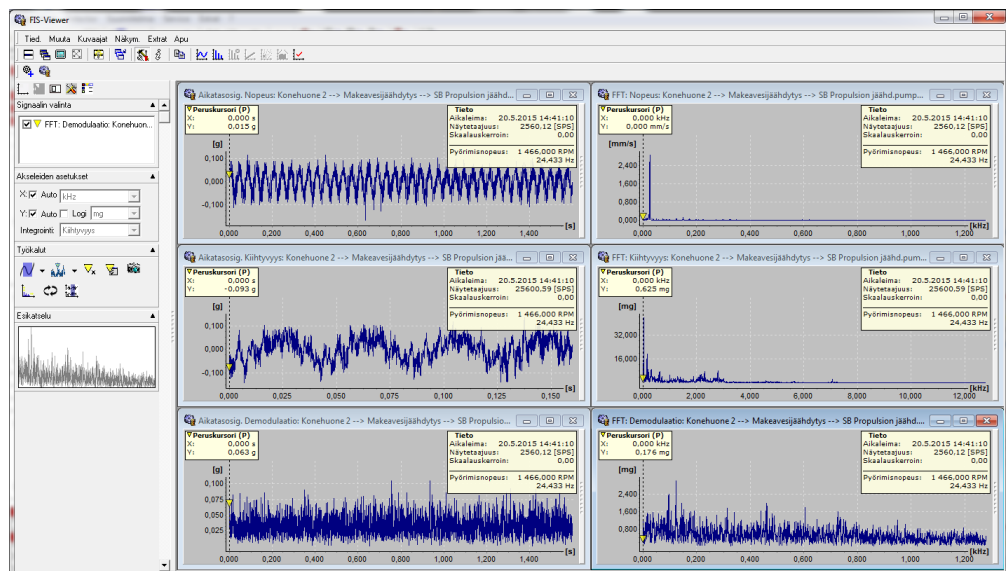
- Kuntoon perustuva kunnossapito
- PSK -käsikirja 3. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus

Trendline -sovellus mahdollistaa useiden mittaustietojen yhdenaikaisen tarkastelun. Mittaustieto siirretään sovellukseen kannettavasta mittalaitteesta datakaapelin välityksellä. Sovellus tallentaa kaikki mittaustiedot tietokantaan, josta ne ovat käytettävissä trenditarkastelua varten. Näiden ominaisuuksien käyttö helpottaa mittaustulosten analysointia. Analysoinnista vastaavien henkilöiden tulee hallita sovelluksen käyttöominaisuudet. Analysointityökalujen käyttöä on opastettu selkeästi Trendline -sovelluksen englanninkielisessä ohjekirjassa. VL Turvalla käytössä olevassa sovelluksessa on mahdollista hyödyntää erilaisia mittaussignaalien ja hälytysrajatietojen esitystapoja. Oikealla esitystavan valinnalla tehostetaan mittaussignaalin tarkastelun tarkkuutta. Kuvassa 49 on esitetty hälytysrajojen tarkasteluun käytettävä grafiikka-ikkuna.










Kuva 49. Trendline -sovelluksen hälytysten grafiikka-ikkuna. (Trendline -sovellus)

Myös mittaussignaalin tarkasteluun on käytössä useita eri esitystapoja. Analyysivaiheessa voidaan valita käyttöön kussakin tilanteessa parhaiten sopiva esitystapa. Signaalit aukeavat erilliseen FIS -viewer ikkunaan. Käytettävissä olevia aikatasosignaalin esitystapoja ovat mittaussuureet nopeus ja kiihtyvyys. FFT -ikkunassa voidaan tarkastella mittaussignaalia eri taajuualueilla ja demodulaationa. Kuvassa 50 on esitetty FIS -viewer ikkuna, johon on liitetty edellä mainittuja mittaussignaalien esitystapoja.



Kuva 50. FIS -viewer ikkuna. (Trendline -sovellus)

Monipuolisella kursorityökalujen käytöllä voidaan tehostaa analysointia. Kursorityökalut ovat Trendline -sovellukseen valmiiksi määritettyjä apuvälineitä, joiden avulla mittaussignaalia voidaan tarkentaa selvemmin tulkittavaksi kokonaisuudeksi. Zoomaus -työkalulla voidaan tarkentaa mittaussignaalin osaa- aluetta. Kursorityökaluilla puolestaan on mahdollista merkitä ja laskea signaalin amplitudiarvojen poikkeamaa sekä esiintymisaluetta. Työkaluja voidaan käyttää hieman toisistaan poikkeavasti signaalin esitystavasta riippuen. Kuvassa 51 on esitetty sovelluksen kursorityökaluja ja niiden käyttömahdollisuuksia. (Schaeffler Group. 2011, 154 - 160.)

Tool & symbol		Description
Base cursor (FFT, time signals, Trend data)		You can use the base cursor to determine the measured values on the x- and y-axis of a measuring point.
Measure cursor (Time signals)		You can use the measure cursor to calculate the difference, the effective value (root mean square) and the arithmetic mean between two measured values as well as the minimum/maximum value.
Difference cursor (FFT, time signals, Trend data)		You can use the difference cursor to calculate the difference between two measured values.
RMS/AMV cursor (FFT, time signals)		You can calculate the effective value (root mean square) and the arithmetic mean between two measuring points using the RMS/AMV cursor.
Harmonic cursor (FFT)		You can use the harmonic cursor to determine measured values at points in the diagram where harmonics (multiples of the basic frequency) are likely to occur.
Sideband cursor (FFT)		You can use the sideband cursor to determine additional measured values in definable sidebands starting from the base cursor.
HS cursor (FFT)		The HS cursor (Harmonic with Sidebands) combines both cursor types described above which means that both the harmonics and their sidebands will be displayed.

Kuva 51. Trendline -sovelluksen kursorityökalut. (Schaeffler Group. 2011, 157)

4.6 Tavoitteet

Laakerien värähtelymittauksien tavoitteena on tuottaa luotettavaa trenditietoa laitteen käyttökunnosta ja huoltotoiminnasta vastaavalle henkilöstölle. Värähtelytrendin seuranta yhdessä muiden käytettävissä olevien mittaussparametrien

kanssa auttaa VL Turvan käyttöhenkilöstöä määrittämään ennakoivasti laitekohtaisen huollon ja korjaustoimenpiteiden tarpeen. Kattavalla trendiseurannalla voidaan myös ehkäistä liiallista huoltoa, jota on käsitelty tarkemmin sivuilla 15 - 16 (luku 2.3). Värähtelymittaukset ovat lisäksi tehokas keino määrittää laakerivikoja. Kiihtyvyyssanturilla tehtyjä mittauksia voidaan tarkastella analysoimalla aikatasosignaalia ja taajuusspektriä. Erilaiset vikaantumismallit esiintyvät taajuustasoesityksessä yksilöllisinä mittaussignaalista havaittavina muutoksina. Luotettavalla värähtelymittaustoiminnalla saavutetaan lopulta myös taloudellista hyötyä. Korjaustoimet voidaan ajoittaa trendiseurannalla hetkeen, jossa laitteen toiminnan voidaan jo arvioida heikentyvän. Määräaikaan perustuvat laakerinvaihdot vähentyvät ja sen myötä myös asennusvirheistä johtuvat vikaantumiset. Yhtenä tavoitteista voidaan pitää myös teknisen henkilöstön työajan käytön tehostumista. Oikein mitoitettuna värähtelymittauksilla kuormitetaan vain vähän henkilöstöä. Luotettavan mittaustoiminnan myötävaikutuksella pystytään keskittämään paremmin henkilöstön työaikaa välitöntä huoltoa tarvitseviin kohteisiin.

5 LOPPUPÄÄTELMÄ

Opinnäytetyön tavoitteena oli suunnittelutyön ja siihen perustuvan toteutuksen tekeminen laakerien värähtelymittauksien aloittamiseksi VL Turvalla. Tämä kokonaisuus osoittautui erittäin haastavaksi ja mielenkiintoiseksi projektiksi. Opinnäytetyön kirjallinen osio käsittää vain osan koko projektin laajuudesta. Suurin osa projektista on tapahtunut aluksen laitetoissa, joihin mittauspisteet on määritetty ja merkitty. Olen saanut projektin aikana tukea aluksen konepäälliköiltä ja Rajavartiolaitoksen alustarkastajilta niin työajan käytön, kuin ammatillisten neuvojenkin muodossa. Opinnäytetyön haasteellisuutta lisäsi uudella laivalla työskentely. Uusi laiva ja sen laitteiston käyttö on vaatinut perehtymistä erilaisiin järjestelmiin. Osittain järjestelmiin perehtyminen samanaikaisesti värähtelymittaustoiminnan aloittamisen kanssa ovat olleet toisiaan tukevia osa-alueita.

Mittaustoiminnan aloittamisen edellyttämiin valmisteluihin kului paljon työtunteja. Laitteiden laakeritietojen etsiminen osoittautui joidenkin laitevalmistajien kohdalla haastavaksi tehtäväksi. Laitemanuaaleissa oli joissakin tapauksissa

käytetty laakerin kohdalla yksilöintitietona ainoastaan varaosanumeroa. Tämän johdosta laakerityypin tiedot oli selvitettävä suoraan laitevalmistajilta. Trendline -sovelluksen valmis, jopa 20 000 erilaista laakeraa kattava tietokanta helpotti mitattavien laakereiden syöttämistä mittauspistetietoihin.

VL Turvalla toteutettava värähtelyjen mittaustoiminta on vasta alkuvaiheessa. Oman arvioni mukaan opinnäytetyön projektilla on mittaustoiminnan aloitukselle luotu riittävän hyvät edellytykset. Mittaustoimintaa on jatkossa kuitenkin arvioitava kriittisesti ja havaintojen perusteella tehtävä tarpeellisia muutoksia mittauskäytäntöihin. Vielä ei pystytä määrittämään mittaustoiminnan hyötyjä tai haittoja. Muutaman vuoden päästä olemme tilanteessa, jossa mittaustoimintaa voidaan arvioida toimivuudeltaan laivaolosuhteissa tarkemmin. Henkilökohtaisesti näen asian siten, että jo yhdenkin vakavan laitteistovaurion estäminen mittauksien avulla maksaa tehdyt taloudelliset ja työaikana käytetyt panostukset takaisin.

Mittaustulosten analysointiin on keskitettävä huomio heti alusta alkaen. Analysoinnista vastaavat henkilöt tulee nimetä ja heille on järjestettävä riittävästi aikaa tutustua värähtelymittauksien analysointia käsittelevään kirjallisuuteen. Tämän lisäksi on suositeltavaa harkita heille järjestettäväksi maksullista analysointikoulutusta. Suuret laakerivalmistajat järjestävät tällaisia koulutuksia. Asianmukaisinta olisi käyttää mittauslaitteiston valmistajan järjestämää koulutusta. Tällöin koulutuksesta saatava tieto olisi kokonaishallinnan kannalta eksaktia. Aiemmin mittauslaitteen hankinnan yhteydessä järjestetty koulutus ei välttämättä ole vielä riittävä.

Värähtelymittauksien avulla saatava mittaustieto auttaa arvioimaan alukselle asennettujen pyörivien laitteiden käytönaikaista tilaa. Tämän lisäksi mittauksia voidaan hyödyntää myöhemmin elinkaaren aikana toteutettavien huoltojen jaksotukseen ja vikadiagnosointiin. VL Turvalta saatuja kokemuksia värähtelymittauksista voidaan jatkossa hyödyntää myös muilla Rajavartiolaitoksen aluksilla toteutettavaan kunnonvalvontaan.

VL Turvalla on näkemykseni mukaan tarve tehokkaalle käytönaikaiselle kunnonvalvonnalle. Värähtelymittaustoiminnalla voidaan tehostaa henkilöstöressurssin käyttöä ja taloudellisuutta. Monitoimialuksen laajasta laitteistokokoon-

panosta johtuen huoltokohteiden määrä on moninkertainen verrattuna esimerkiksi kaupallisen liikenteen rahtialukseen. Teknisen henkilöstön määrä on kuitenkin yhdenmukainen rahtialuksen kanssa. Oikein toteutettuna värähtelymitaukset tulevat palvelemaan VL Turvan teknistä henkilöstöä huollon suunnittelussa ja kohdentamisessa koko aluksen elinkaaren ajan.

LÄHTEET

ABB. 2000. TTT-käsikirja. Luku 23: Kunnonvalvonta ja huolto. Saatavissa: http://heikki.pp.fi/opetus/pedanet/papkem/230_0007.pdf [viitattu 20.6.2015]

Ansaharju, T. 2010. Koneenasennus ja kunnossapito. 1.-2. painos. Helsinki: WSOYPro Oy.

Elomatic. 2014. Elowise-ohjelmisto. Saatavissa: <http://www.elomatic.com/fi/palvelut-ja-tuotteet/tiedonhallintatyokalut/elowise/> [viitattu 3.8.2015]

Järviö, J & Lehtiö, T. 2012. Kunnossapito. Tuotanto-omaisuuden hoitaminen. 5. uudistettu painos. Helsinki: KP-Media Oy.

Karppelin, A. 2014. Rajavartiolaitoksen partiovene PV08:n kunnossapito. Opinnäytetyö: Kymenlaakson ammattikorkeakoulu.

Kautto, J. 2011. Värähtely vaikuttaa koneen kestoikään. Promaint 5/2011, s. 14-16. Saatavissa: [http://files.kotisivukone.com/residuumcm.kotisivukone.com/tiedostot/varahtely vaikuttaakoneenkestoikaan.pdf](http://files.kotisivukone.com/residuumcm.kotisivukone.com/tiedostot/varahtely_vaikuttaakoneenkestoikaan.pdf) [viitattu 15.7.2015]

Kunnossapidon toiminnot ennen vian ilmenemistä. Opetushallitus. Saatavissa: http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/perusteet_2-3_kunnossapidon_toiminnot_ennen_vian_ilmenemista.html [viitattu 19.6.2015]

Lumme, V. Backholm, M. Kautto, J. Miettinen, J. Nohynek, P. Suhonen, T. Valtokari, J. Kurkinen, P. Witick, M. 2013. PSK-käsikirja 3. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. 17. painos. Helsinki: Copyset Oy.

Mikkonen, H. Miettinen, J. Leinonen, P. Jantunen, E. Kokko, V. Riutta, E. Su-
lo, P. Komonen, K. Lumme, V. Kautto, J. Heinonen, K. Lakka, S & Mäkeläi-
nen, R. 2009 Kuntoon perustuva kunnossapito. 1. painos. Helsinki: KP-Media
Oy.

Mäkelä, M. Soininen, L. Tuomola, S & Öistämö, J. 2010. Tekniikan Kaavasto. 9. painos. AMK-Kustannus Oy Tammertekniikka.

Schaeffler Group. 2011. User manual FAG Detector III and F'IS Trendline 3. Herzogenrath: FAG Industrial Services GmbH.

Schaeffler Technologies AG & Co. KG. 2013. Vierintälaakerin asennus ja kunnossapito. Tuotteet, palvelut ja koulutus. s.a. s.l.

The difference between RMS, peak and peak to peak amplitudes. Vibration school. Saatavissa: <http://www.vibrationschool.com/mans/Plots/Plots03.htm> [viitattu 11.7.2015]

Pumppujen vianhaku spektrin avulla

Syy	Voimakkuus	Taajuus	Vaihe	Huomautuksia
Epätasapaino	Verrannollinen epätasapainoon. Suurin säteissuunnassa	$1 \times n$	Yksi vakaa merkki	Yleinen syy värähtelyihin
Kytöimen tai laakerin asennusvirhe. Tajunut akseli	Suuri aksiaalisuunnassa. Yli 50% säteisvärähtelyä	Norm. $1-2 \times n$ Usein myös $3-6 \times n$		1, 2 tai 3 merkkiä. Jos koneessa on liukulaakerit eikä siinä ole rihtausvirhettä, tasapainota roottori
Vikaantunut vierintälaakeri	Vaihtelee	Välillisen vierintäselimen taajuuDET: Ulkokehä: $F_u = (N/2) \times f [1 - (d/D) \times \cos\beta]$ Sisäkehä: $F_s = (N/2) \times f [1 + (d/D) \times \cos\beta]$ Kuula/Rulla: $F_k = 0.5 \times (D/d) \times f [1 - (d/D)^2 \times \cos^2\beta]$ Myös korkeataajuisia (2-60 kHz) resonanssivärähtelyä.	Epävakaa.	N =kuulamäärä/rivi d =kuulan halkaisija D =jakohalkaisija f =sisä- ja ulkokehien pyörimistaajuuksien erotus β =kosketuskulma
Mekaaninen välily	Verrannollinen välilyseen	$2 \times n$	2 merkkiä, Tav. hieman epävakaa	Yleensä yhdessä as.virheen tai epätasapainon kanssa
Säteislaakerin väljä pesä		$n/2$, joskus $n/3$		Välily esiintyy tavallisesti vain norm. käyntinopeuksilla ja lämpötilassa
Kuluneet hammaspyörät	Vaihtelee	$Z \times n$ ja sen monikerrat, joskus $0.5 \times Z \times n$	Useita merkkejä Epävakaa.	
Resonanssi	Suuri	Kriittinen pyörimis- taajuus	Yksi merkki	Vaihekulma muuttuu 180° ohitettaessa resonanssikohta. Värähtely kasvaa voimakkaasti resonanssikohtaa lähestyttäessä.
Sähköinen epätasapaino		$1-2 \times$ synkronitaajuus $1 \times n$	1 tai 2 pyörivää merkkiä	Värähtely heikkenee äkillisesti katkaistaessa virta koneesta
Välilliset käyttöhihnat	Säännönmukaisia	$1-4 \times$ hihnan pyörimis- taajuus	$1-2$ merkkiä, yleensä epävakaita	Stroboskooppi kätevä työkalu hihnavian toteamiseen
Hydrauliset ja aerodynaamiset voimat	Yleensä alhainen	$1 \times n$, siipiluku $\times n$ ja tämän monikerrat		Yleensä herättää joninlaisen resonanssin
Edestakaiset massavoimat		$1-2 \times n$, joskus korkeampia monikertoja	Luontainen mäntäkoneille	Voidaan pienentää vain alustaa tai rakennetta parantamalla
Epäkeskeiset akselitapit	Normaalisti alhainen	$1 \times n$	Yksi merkki	Moottoreissa/generaattoreissa värähtely häviää, kun virta katkaistaan. Vaihteissa värähtely on voimakkainta akselin suunnassa. Jos vika on puhaltimessa, yritä tasapainottaa
Kitka	Vaihtelee	Jatkuva kitka, useita taajuuksia, Ajoittain $1-2 \times n$	Epävakaa	
Välillinen liuku-laakeri		$1 \times n$	Yksi vakaa merkki	Vertaa akselin ja laakeri- pesän mittausarvoja toisiinsa.
Öljykalvon pyörteily	Vaihtelee	$0,42 - 0,48 \times n$	Epävakaa	Tulee kysymykseen laitteilla joilla on korkea pyörimistaajuus.

Laitetason kriittisyyden tekijät

Kohde	Painoarvo [W]	Vikaväli (p)	Kerroin [M]	Valintakriteeri
Turvallisuus- ja ympäristövaikutukset	Turvallisuusriskit Ws = 30	1 = Pitkä vikaantumisväli esimerkiksi yli 5 vuotta 2 = Pitkähkö vikaantumisväli esimerkiksi 2 – 5 vuotta 3 = Lyhyehkö vikaantumisväli esimerkiksi 0,5 – 2 vuotta 4 = Lyhyt vikaantumisväli esimerkiksi 0 – 0,5 vuotta	Ms = 0	Ei turvallisuusriskiä
			Ms = 2	Vähäinen turvallisuusriski
			Ms = 4	Kohtalainen turvallisuusriski
			Ms = 8	Merkittävä turvallisuusriski
			Ms = 16	Vakava turvallisuusriski
	Ympäristöriskit We = 20		Me = 0	Ei ympäristöriskiä
			Me = 2	Vähäinen ympäristöriski
			Me = 4	Kohtalainen ympäristöriski
			Me = 8	Merkittävä ympäristöriski
			Me = 16	Vakava ympäristöriski
Tuotantovaikutukset	Tuotannon menetykset Wp = 0...100		Mp = 0	Laitteen toimimattomuudella ei merkitystä osaprosessille tai osastolle
			Mp = 1	Laitteen toimimattomuus pysäyttää osaprosessin tai osaston hetkeksi (esimerkiksi ≤3 h)
			Mp = 2	Laitteen toimimattomuus pysäyttää osaprosessin tai osaston lyhyeksi ajaksi (esimerkiksi ≤10 h)
			Mp = 3	Laitteen toimimattomuus pysäyttää osaprosessin tai osaston merkittäväksi ajaksi (esimerkiksi 10 - 24 h)
			Mp = 4	Laitteen toimimattomuus pysäyttää osaprosessin tai osaston pitkäksi ajaksi (esimerkiksi >24 h)
	Laatukustannus Wq = 30		Mq = 0	Laitteen toimimattomuus ei aiheuta lopputuotteen laatukustannuksia.
			Mq = 1	Laitteen toimimattomuus aiheuttaa lopputuotteen laatukustannuksia, jotka vastaavat hetkellistä tuotannonmenetystä (esimerkiksi ≤1 h)
			Mq = 2	Laitteen toimimattomuus aiheuttaa lopputuotteen laatukustannuksia, jotka vastaavat lyhytaikaista tuotannonmenetystä (esimerkiksi ≤3 h)
			Mq = 3	Laitteen toimimattomuus aiheuttaa lopputuotteen laatukustannuksia, jotka vastaavat merkittävää tuotannonmenetystä (esimerkiksi 3-8 h)
			Mq = 4	Laitteen toimimattomuus aiheuttaa lopputuotteen laatukustannuksia, jotka vastaavat pitkäaikaista tuotannonmenetystä (esimerkiksi >8 h)
Korjaus- tai seurauskustannukset	Korjaus- tai seurauskustannus Wr = 20		Mr = 0	Korjauskustannuksilla tai seurauskustannuksilla ei ole merkitystä suhteessa muihin menetyksiin.
			Mr = 1	Vähäiset korjauskustannukset tai seurauskustannukset, jotka vastaavat hetkellistä tuotannonmenetystä (esimerkiksi ≤2 h)
			Mr = 2	Keskinkertaiset korjauskustannukset tai seurauskustannukset, jotka vastaavat lyhytaikaista tuotannonmenetystä (esimerkiksi ≤10 h)
			Mr = 3	Korkeat korjauskustannukset tai seurauskustannukset, jotka vastaavat merkittävää tuotannonmenetystä (esimerkiksi 10-24 h)
			Mr = 4	Korkeat korjauskustannukset tai seurauskustannukset, jotka vastaavat pitkäaikaista tuotannonmenetystä (esimerkiksi >24 h)

Jatkuvatoimisille laitteille suositeltavat mittausvälit

Taulukko 1 Suositeltavia värähtelyn mittausvälejä jatkuvatoimisilla laitteilla.			Table 1. Recommended vibration measurement intervals for machines in continuous operation.						
Koneityyppi Machine type	Kriittisyys Criticality	Raskaus Stress	Suositeltava mittausväli Recommended measurement interval						
			Jaksottainen kunnonvalvontamittaus				Tarkastusmittaus ¹⁾		
			kiinteä on line	2 xko 2 weeks	4 xko 4 weeks	2 kk 2 months	4 kk 4 months	6 kk 6 months	12 kk 12 months
Pumppu ja puhallin Pump and fan / blower	kriittinen critical	kova heavy	X						
	kriittinen critical	kevyt light	X						
	ei kriittinen non critical	kova heavy							
	ei kriittinen non critical	kevyt light							
Turbogeneraattori Turbogenerator	kriittinen critical	väkeä alt	X						†
Ruiskukompressor Spray compressor	kriittinen critical	kova heavy	X						
	kriittinen critical	kevyt light	X						
	ei kriittinen non critical	kova heavy							
	ei kriittinen non critical	kevyt light							
Vaihteisto Gear	kriittinen critical	kova heavy	X						†
	kriittinen critical	kevyt light	X						†
	ei kriittinen non critical	kova heavy							†
	ei kriittinen non critical	kevyt light							
Moottori Motor	Mittausväli määritetään käytetyn lajikkeen mukaan. Vibration interval is determined based on the driven machine. The measurement interval shall be based on the driven machine.								
Telat Cylinders	kriittinen critical	kova heavy	X						
	kriittinen critical	kevyt light	X						
	ei kriittinen non critical	kova heavy							
	ei kriittinen non critical	kevyt light							

¹⁾ kiinteä järjestelmä on ensisijainen kriittisille koneille, toteutus määritellään taloudellisilla perusteilla

²⁾ a permanent online system is the primary choice for critical machines and is implemented on economical grounds

Tuomio: Mittausväli jaksottaisessa kunnonvalvonnassa tulisi sijaita tällä alueella. Mittausväli tarkennetaan kokemukspohjaisesti. Mittausväli on esitetty aika-alueina todennäköisimmän vikaantumismekanismin etenemisnopeuden mukaan olettaen, että suoritetaan muitakin valvontaa kuin värähtelymittauksia.

Dark: The measurement interval in periodical condition monitoring should fall in this range. The measurement interval shall be adjusted based on experience. The measurement intervals have been presented as time slots according to the progress rate of the most probable fault mechanisms and assuming that other methods than vibration measurements are used for monitoring.

¹⁾ Kertaluonteisella tarkastusmittauksella täydennetään säännöllisin mittausvälein tai kiinteällä järjestelmällä tehtyjä mittauksia. Menetelmänä käytetään monipuolisempia mittausmenetelmiä kuin säännöllisessä kunnonvalvonnassa.

²⁾ Occasional checks are used to supplement the measurements performed at regular intervals or by online systems. More versatile measurement methods than during the periodic condition monitoring shall be used.